Июль 1998 г. **УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК** *Том 168, № 7*

ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

Естественные и техногенные низкочастотные магнитные поля как факторы, потенциально опасные для здоровья

Н.Г. Птицына, Дж. Виллорези, Л.И. Дорман, Н. Юччи, М.И.Тясто

Влияют ли на здоровье человека низкочастотные магнитные поля малой интенсивности, типичные для окружающей среды? Ряд работ, результаты которых не опровергнуты до сих пор, отвечают положительно на этот вопрос. В связи с этой проблемой недавно стали рассматривать иррегулярные магнитные поля УНЧ (0 – 10 Гц) *диапазона со сложным спектральным составом. Такие черты характерны для естественных геомагнитных возмущений, а также для магнитных полей от электротранспорта. Последние результаты свидетельствуют о том, что эти поля могут влиять на нервную систему и, возможно, вызывать инфаркты миокарда.*

PACS numbers: **87.40.+w**, **87.50.–a**

Содержание

Н.Г. Птицына, М.И.Тясто. Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН (СПбФ ИЗМИРАН), 191023 Санкт-Петербург, Мучной пер. 2, Россия
Факс (7-812) 310-50-35
E-mail: galina@admin.izmi.ras.spb.ru, natasha@ngp.izmi.ras.spb.ru
Дж. Виллорези. Institut di Fisica Spacio Interplanetario, Consiglio Nazionall delle Ricerche (IFSI/CNR), Universita' degli Studi "Roma Tre", Dipartamento di Fisica "E. Amaldi",
Via della Vasca Navale 84, 00146 Rome, Italy
Tel. 39-6-551 77 249. Fax +39-6-557 93 01
E-mail: villoresi@amaldi.fis.uniroma3.it
Л.И. Дорман. Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН (ИЗМИРАН),
142092 Троицк, Московская обл., Россия
Факс (7-095) 334-09-24
Cosmic Ray Center, Technion, Haifa 32000, Israel
Fax (972) 6-961930
E-mail: lid@physics.technion.ac.il
Н. Юччи. Universita' degli Studi "Roma Tre", Dipartamento di Fisica "E. Amaldi", Via della Vasca Navale 84, 00146 Rome, Italy
Fax +39-6-557 9303
E-mail: iucci@amaldi.fis.uniroma3.it

Статья поступила 23 сентября 1997 г.,
после доработки 14 ноября 1997 г.

© Н.Г. Птицына, Дж. Виллорези, Л.И. Дорман, Н. Юччи, М.И.Тясто 1998

1. Введение

В окружающей среде постоянно присутствуют электромагнитные поля естественного и искусственного происхождения. Основными естественными электромагнитными полями являются атмосферное электричество, постоянное магнитное поле Земли и геомагнитные вариации, возникающие при взаимодействии земного магнитного поля с межпланетной средой. В течение нескольких последних десятилетий уровень интенсивности электромагнитного окружения катастрофически возрос: технические устройства, генерирующие электромагнитные поля, широко используются на заводах, в транспортных системах, в учреждениях, в домах и т.д. Эта новая ситуация часто определяется как "электромагнитное загрязнение" или "электромагнитный смог".

Хотя электромагнитный спектр занимает область от 0 до 10^{20} Гц, основные составляющие электромагнитного загрязнения лежат в крайне низкочастотном (КНЧ: 10 – 300 Гц) и особенно в ультранизкочастотном (УНЧ: 0 – 10 Гц) диапазоне. В этих частотных диапазонах электрическую и магнитную составляющие можно рассматривать независимо. Экспериментальные и эпидемиологические данные, а также теоретические доводы говорят о том, что скорее магнитная, а не электрическая составляющая электромагнитных окружающих полей имеет отношение к биоэффектам, так как магнитное поле может свободно проникать в ткани [1 – 3]. В прошлом было много споров относительно того, могут ли электрические и магнитные поля вызывать значимые биологические эффекты. Интенсивность магнитных полей с частотами менее 300 Гц, типичными для нашего окружения, обычно ниже или такого же порядка, что и интенсивность земного постоянного магнитного поля ($\sim$ 50 мкТл) и они рассматриваются как "слабые". В настоящее время в международном научном сообществе распространено мнение, что воздействие слабых низкочастотных электрических и магнитных полей в окружающей среде может вызывать биологические эффекты, несмотря на тот факт, что энергия таких полей очень мала [4 – 6]. Соответственно возникает озабоченность, что эти биологические эффекты могут приводить к проблемам со здоровьем. Серии публикаций под сенсационными заголовками "Токи смерти" [7] и "Смертельно опасные поля" [8] привлекли внимание широкой публики к исследованиям в области биоэлектромагнетизма. Этот вопрос, оставаясь во многом спорным, вызывает всеобщий интерес, и на эту тему уже опубликовано более 20 000 научных докладов и статей. Основное внимание при исследовании потенциальной опасности для здоровья электрических и магнитных полей уделялось техногенным полям с частотой 50 – 60 Гц, особенно полям от линий электропередач (ЛЭП) из-за их возможной связи с увеличением количества злокачественных заболеваний (см., например, [9, 10]). В последнее время в этой связи стали рассматривать также магнитные поля, генерируемые электрифицированным транспортом, которые дают основной вклад в магнитное окружение плотно населенной городской среды. Транспортные поля отличаются от почти синусоидальных магнитных полей на промышленных частотах: они имеют сложную частотную структуру, главным образом, с частотными компонентами ниже 15 Гц [11 – 14].

В последние десятилетия также было выполнено много исследований, касающихся возможной опасности для здоровья естественных возмущений магнитного поля Земли, обусловленных солнечной активностью. Эти геомагнитные вариации лежат, в основном, ниже 10 Гц, т.е. в УНЧ диапазоне. Физики относятся скептически к идее о том, что естественные геомагнитные вариации могут как-то влиять на живые системы, потому что часто интенсивность этих вариаций еще меньше, чем интенсивность техногенных полей в окружающей среде. В то же время можно ожидать особой чувствительности живых систем к естественному геомагнитному полю, так как нервные структуры должны были постоянно взаимодействовать с этими полями в процессе эволюции. Действительно, ряд исследований показал, что есть значимая корреляция между количеством клинически важных патологий и большими геомагнитными возмущениями, так называемыми геомагнитными бурями. Основные результаты были получены для нервных и сердечно-сосудистых заболеваний (см., например, [15 – 20]).

Этот обзор является выборочным: мы обсудим, главным образом, вопрос о возможном влиянии на здоровье человека УНЧ магнитных полей и остановимся на биомедицинских эффектах центральной нервной и сердечно-сосудистой систем, уделив основное внимание последним результатам в этой области. Отличительной особенностью нашего обзора является также совместное рассмотрение биоэффектов естественных и искусственных магнитных полей.

2. Магнитные поля в окружающей среде; общие характеристики

Магнитные поля в окружающей среде генерируются электрическими токами. Интенсивность этих полей зависит от геометрии электрических цепей, силы тока в проводниках и от расстояния наблюдателя до электрической цепи. В простейших случаях, когда имеется один протяженный линейный проводник с током, два параллельных проводника или проводник в виде петли, магнитное поле B пропорционально $1/r^n$, где n равно соответственно 1, 2 или 3 для трех вышеупомянутых случаев. В действительности, когда имеется больше, чем один проводник с током и электрическая цепь имеет сложную конфигурацию, то существует разной степени ослабление или усиление токов $\left[B = \sum(1/r^n)\right]$.

2.1. Естественные магнитные поля

Естественные магнитные поля — это постоянное магнитное поле Земли и геомагнитные вариации, возникающие при взаимодействии межпланетной среды с магнитным полем Земли. Постоянное магнитное поле генерируется токами, текущими на глубинах гораздо ниже земной коры. Величина геомагнитного поля меняется по земной поверхности от 35 мкТл на экваторе до 65 мкТл вблизи полюса. Солнечная активность и связанные с ней возмущения межпланетной среды генерируют изменяющиеся во времени магнитные поля общепланетарного масштаба, главным образом, в УНЧ диапазоне. Пульсации геомагнитного поля в частотной области 0,001 – 10 Гц часто наблюдаются по всему земному шару с амплитудами 0,1 – 100 нТл. Пульсации могут быть регулярными (Pc) и нерегулярными (Pi).

Плазма солнечного ветра, постоянно обтекающая Землю, создает вокруг Земли область, ограничивающую геомагнитное поле. Эту область, содержащую плазму и земное магнитное поле, называют магнитосферой (рис. 1). Приход на Землю высокоскоростного потока солнечной плазмы, генерируемого нестационарными процессами на Солнце, и связанной с ним ударной волны вызывает геомагнитные бури. Взаимодействие межпланетных возмущений с магнитосферой приводит к пересоединению межпланетного магнитного поля с геомагнитным и к изменениям размеров магнитосферы, которые зависят от величины потока солнечной плазмы. Это позволяет проникнуть в магнитосферу новым частицам или ускорить заряженные частицы плазмы до энергий в несколько килоэлектронвольт. Так формируются сложные системы токов в магнитосфере и ионосфере. Во время больших геомагнитных бурь в течение 1–2 дней могут наблюдаться сильные флуктуации, обусловленные наложением эффектов от экваториального кругового тока и авроральных токов: амплитуды флуктуаций поля составляют 200–300 нТл на низких широтах и достигают выше 1000 нТл на высоких широтах. Геомагнитные бури связаны с резким увеличением флуктуаций поля во всех частотных диапазонах [21, 22]. На рисунке 2 показана запись геомагнитной бури 13 марта 1989 г. на ст. Ла Аквила (42 град. северной широты). Во время этой бури среднечасовые значения вариаций поля были выше фоновых значений в 10 000 раз для пульсаций $Pc1$ (0,2–5 Гц) и в 3000–5000 раз для пульсаций $Pc3-Pc5$ (частоты менее 0,1 Гц) [23].

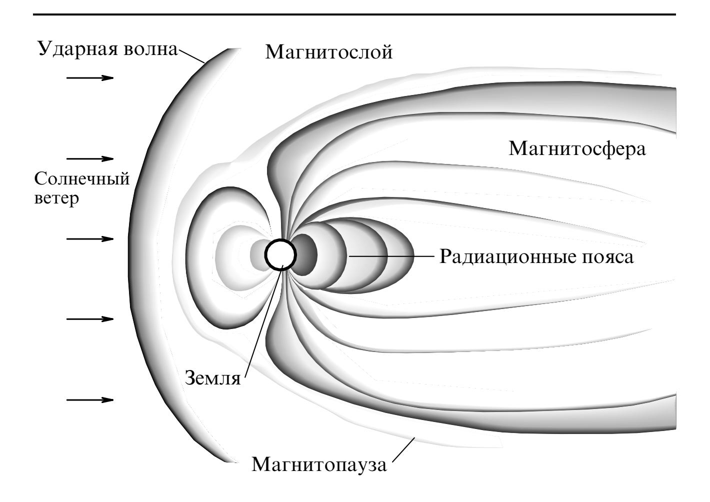


Рис. 1. Магнитосфера Земли. Магнитный хвост магнитосферы простирается на несколько тысяч земных радиусов.

Для описания уровня геомагнитной возмущенности было введено несколько геомагнитных индексов. Наиболее широко используется планетарный индекс Kp, который рассчитывают по значениям локальных индексов K по ряду выбранных обсерваторий для каждого трехчасового интервала. K-индекс выбранной обсерватории описывает вариации магнитного поля в логарифмическом масштабе таким образом, что максимальное и минимальное значения амплитуд вариаций соответствуют $K = 0$ и $K = 9$. Индекс Ap — это линейный индекс, получаемый из трехчасовых значений планетарного Kp-индекса. Значение Ap меняется от 0 до 400. Очень похож на Ap часто используемый в солнечно-земной физике

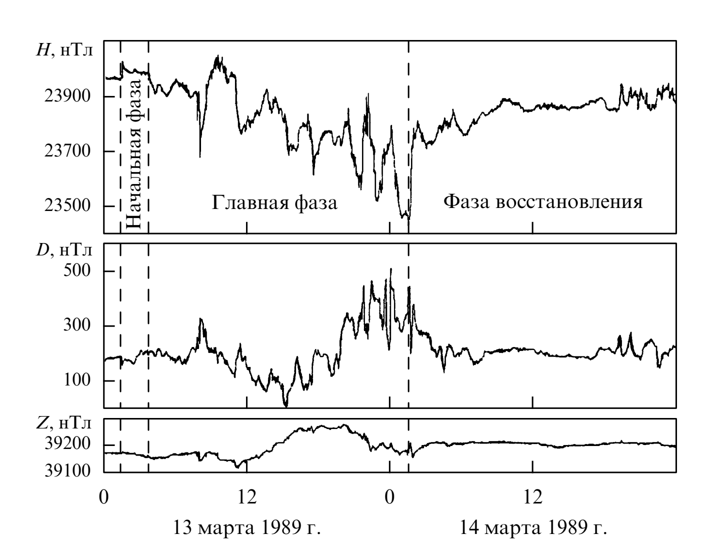


Рис. 2. Запись геомагнитной бури на ст. Ла Аквила 13 марта 1989 г. H, Z — горизонтальная и вертикальная компоненты поля, D — склонение [23].

индекс aa, в котором учтены суточные и годовые вариации поля.

2.2. Техногенные магнитные поля

Сильные техногенные магнитные поля на частоте 50 Гц (60 Гц в США) можно обнаружить в непосредственной близости от домашней бытовой электротехники: например, 1 мкТл — от холодильника, 10 мкТл — от кофеварки, 100 мкТл — от микроволновой печи [24]. Ручная электробытовая техника (электробритвы, электрические фены для сушки волос и т.п.) способны генерировать на своей поверхности магнитные поля в 500–2000 мкТл [25]. Эти поля генерируются, в основном, круговыми токами малого диаметра и их интенсивность быстро спадает почти до нуля на расстояниях менее 0,5 м. Однако большинство людей проводят не много времени в непосредственной близости от таких полей. Магнитные поля на частоте 50–60 Гц гораздо большей пространственной протяженности можно наблюдать на некоторых производствах и вблизи ЛЭП. Например, повышенные уровни магнитных полей от 3–5 до 10 мкТл наблюдаются в рабочих зонах сталелитейного производства, где для плавки используются электропечи [26]. Было установлено, что интенсивность магнитных полей под ЛЭП напряжением 765 кВ составляет 5 мкТл, на расстоянии 50 м — 1 мкТл (рис. 3 [27]). Однако вклад магнитных полей на промышленных частотах в общий уровень окружающей среды мал, так как фазы полей переменного тока обычно близки и поэтому поля в значительной степени взаимно компенсируют друг друга.

Самые сильные поля большой пространственной протяженности в плотно населенной городской среде и на рабочих местах генерируются общественным рельсовым электротранспортом. Теоретически рассчитанные магнитные поля, генерируемые типичными токами от железной дороги, приведены на рис. 4 [24]. Измерения [28] показали, что интенсивность УНЧ магнитных полей составляет 1 мкТл на расстоянии 100 м от рельсового пути. Магнитные поля, генерируемые электротранспортом, сильно отличаются от полей ЛЭП на частотах 50 или 60 Гц: на записях видны резкие временные измене-

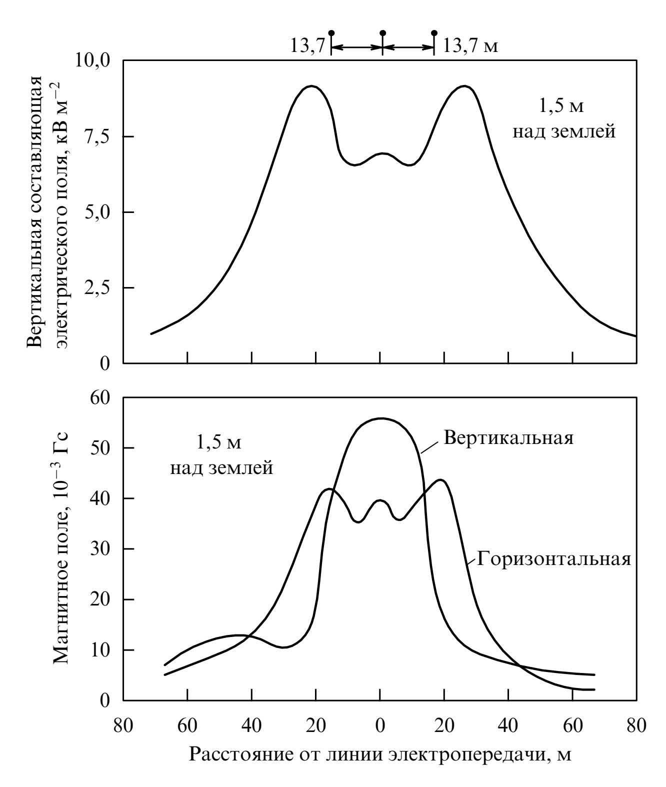


Рис. 3. Электрическое и магнитное поля под ЛЭП с напряжением 765 кВ (60 Гц) при токе 426 А в зависимости от расстояния до ЛЭП (высота линии 15 м). Горизонтальная компонента электрического поля пренебрежимо мала по сравнению с компонентой, вертикальной к земной поверхности. Горизонтальная компонента магнитного поля перпендикулярна к ЛЭП (параллельная ЛЭП компонента пренебрежимо мала) [27].

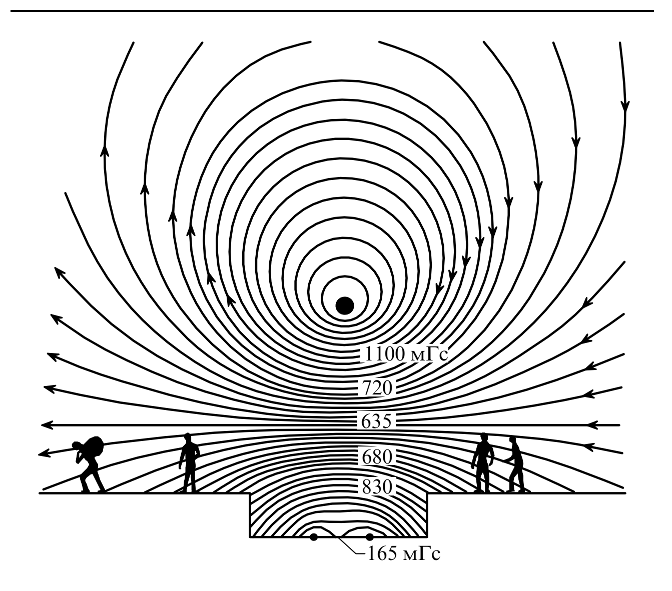


Рис. 4. Конфигурация магнитного поля от электрифицированной железной дороги. Ток 500 А течет от наблюдателя поперек плоскости рисунка, возвратные токи текут через рельсы [24].

ния, импульсы и другие переходные явления, главным образом, на частотах менее 10 Гц, т.е. в УНЧ области [11–13, 29, 30]. Кроме того, рельсы электротранспорта, работающего на постоянном токе, будучи частью электрической цепи, являются источником токов растекания большой протяженности, которые генерируют значительные магнитные поля [31, 32]. Эти токи могут

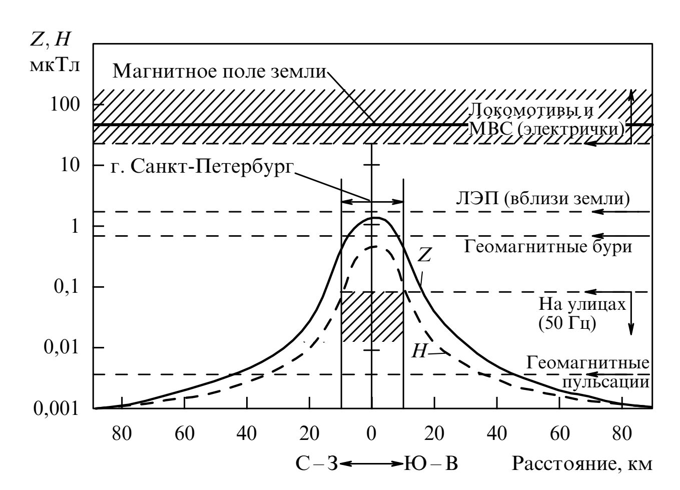


Рис. 5. Распределение УНЧ магнитных полей в окрестности большого индустриального города (Санкт-Петербург). Показаны уровни полей от естественных и техногенных источников [19, 33].

вносить существенный вклад в окружающую магнитную среду: они концентрируются на металлических поверхностях подземных трубопроводов, на коммуникационных кабелях и т.д., имеющих более высокую проводимость, чем земля. На рисунке 5 показано распределение УНЧ магнитных полей в окрестности большого индустриального города на примере Санкт-Петербурга [1]. Измерения были сделаны в центральных районах города и на двух геомагнитных обсерваториях, расположенных на расстояниях 30 и 90 км [19, 33]. В городе уровень техногенных магнитных полей в 1000 раз выше, чем в его окрестностях. На рисунке 5 показаны также средние уровни УНЧ магнитных полей от различных естественных и техногенных источников. Для сравнения приведен типичный уровень магнитных полей на частоте 50 Гц, измеренный на земле под ЛЭП и на улицах. Измерения показывают, что интенсивность УНЧ магнитных полей в поездах, вагонах метро и около них могут возрастать в 10000–100000 раз [13, 14, 34, 35]. Обычно техногенные поля на расстояниях в 30–100 м от источников сравнимы с естественными магнитными вариациями. Однако реальное соотношение величин естественных и техногенных магнитных полей зависит от многих факторов (широты, геомагнитной активности, от характера распределения техногенных источников, подземных проводящих линий и т.д.). До сих пор отсутствуют систематические измерения магнитных полей в городах, особенно в УНЧ диапазоне, которые являются главной составляющей магнитной окружающей среды.

3. Биомедицинские эффекты естественных геомагнитных полей

В последние десятилетия было выполнено много исследований влияния геомагнитных вариаций на здоровье человека. Данные о смертности и заболеваемости сердечно-сосудистой и нервной систем, число госпитализаций по поводу психических заболеваний и число случаев других патологий использовались для исследования их связи с солнечной и геомагнитной активностью (см.,

[1] Ленинград был переименован в Санкт-Петербург в конце 1991 г.

например, [18, 20, 33] и ссылки там). Даже такие экзотические данные, как число галлюцинаций, зарегистрированных в прошлом столетии в США, использовались как материал для биомедицинских исследований [36]. Ряд обзорных статей и книг о биомедицинских эффектах геомагнитных полей был опубликован в России, где эта область исследований традиционно популярна (см., например, [15, 37–39]). Недавно появилось два обзора о биогеомагнитных исследованиях на английском языке [16, 17].

В этом разделе мы приводим только краткую сводку научных результатов и уделяем основное внимание трудностям и методологическим проблемам.

Наиболее значительные результаты относятся к болезням сердечно-сосудистой и нервной систем. Было обнаружено, что есть некоторая связь заболеваемости с геомагнитной активностью [18, 19, 33, 40–49]. Первые пионерские работы, выполненные еще в 1941 г. [50, 51], и более поздние лабораторные исследования корреляции между кровеносной системой человека и солнечной и геомагнитной активностью подтверждают эту связь [52–55]. Недавно мониторинг сердечно-сосудистой функции космонавтов на орбитальной станции "Мир" показал, что наблюдается снижение вариабельности сердечного ритма во время геомагнитных бурь [56].

Также были получены некоторые доказательства связи между геомагнитными возмущениями и возрастанием числа производственных травм и дорожно-транспортных происшествий (ДТП) [20, 57–63]. Эти исследования основывались на предположении, что значительная часть ДТП может быть вызвана неправильной или заторможенной реакцией водителей на транспортную обстановку, что может быть обусловлено влиянием магнитных и электрических полей окружающей среды. Например, в [57, 58] автор установил, что ДТП и несчастные случаи на производстве в Германии были связаны с возмущениями атмосферного электричества и геомагнитного поля (определяемыми по внезапным нарушениям распространения радиоволн). На основе 25 тестов на скорость реакции человека там же было установлено, что во время возмущенных периодов реакции были существенно замедленными. Замедленные реакции наблюдались и при появлении возмущений естественных УНЧ сигналов [64].

Однако существует значительная несогласованность результатов в этой области. В разных исследованиях обнаруживаются корреляции противоположного знака между медико-биологическими параметрами и геомагнитной активностью. Во время повышенной геомагнитной активности некоторые авторы находят увеличение, другие, наоборот, снижение заболеваемости и смертности от болезней сердечно-сосудистой и нервной систем ([37, 38] и ссылки там). Например, было отмечено увеличение числа гипертонических кризов и инсультов после [65], во время [66] и даже до [67] геомагнитных бурь. В разных работах приводятся совершенно разные значения геомагнитной активности, которые могут быть биоэффективными. В [40, 41, 43, 44] было найдено, что биоэффективен высокий уровень геомагнитной активности, в [68], напротив, биоэффективным оказался низкий уровень активности. Анализ, выполненный в [60], показал, что ДТП случались чаще в дни, характеризующиеся средним уровнем геомагнитной активности ($\sum K = 16 \div 24$), в то время как в [62] обнаружено, что число ДТП увеличивается во время умеренно низкой ($\sum K = 8 \div 16$) и очень высокой геомагнитной активности ($\sum K > 32$). Более того, опубликован ряд работ, в которых не получено никакой связи между медико-биологическими параметрами и солнечной и геомагнитной активностью ([37, 69–71] и ссылки там). Таким образом, есть масса расхождений в полученных результатах и очень часто их достоверность вызывает сомнения по следующим причинам:

а) во многих случаях используются не отвечающие требованиям статистические выборки и проводится неполная статистическая обработка, что не позволяет получить четкие статистические доказательства связи между солнечно-геофизическими процессами и заболеваемостью;

б) часто наблюдается некритичный подход к данным, полученным из вторичных источников;

в) в исследованиях используются разные индексы солнечной и геомагнитной активности, которые связаны с разными солнечными и геофизическими процессами, из-за чего результаты трудно сопоставлять;

г) не принимается во внимание мультивариационный характер проблемы;

д) результаты спектрального анализа, который часто используется в биогеомагнитных исследованиях, часто интерпретируются неверно, что приводит к ошибочным выводам.

В качестве характерного примера приведем работу [72], в которой найдена заметная корреляция между сердечными приступами и магнитной активностью на основе медицинских данных, собранных в Индии. В аналогичном исследовании по данным Великобритании не было обнаружено никакой корреляции [70]. Анализ индийских данных показал, что их распределение относительно линии регрессии — субпуассоновское. Это означает, что корреляция в этом случае была выше, чем та, которую можно было бы ожидать, если бы магнитная активность была единственной причиной сердечных приступов, и это вызывает серьезные сомнения в достоверности данных. Данные были получены из вторых рук и при проверке авторы [72] не смогли воспроизвести числовой ряд, полученный ранее, поэтому они извинились за опубликование неверных результатов [73].

Более сложная ситуация сложилась с противоречащими друг другу результатами, полученными Гневышевым и Новиковой [43, 44], с одной стороны, и Липпа с соавторами [69] — с другой. Авторы [43, 44] проанализировали связь между ежедневными данными о смертности от сердечных приступов и инсультов в Свердловске и геомагнитной активностью и нашли положительную корреляцию. Однако никаких статистических оценок они не привели. Липпа с соавторами выполнили аналогичный анализ по данным о смертности от инфарктов в США в целом по стране, а также по трем отдельным городам и не получили статистически значимой связи между ежедневным количеством смертей и геомагнитными индексами. Липпа связывает противоречие в результатах (кроме возможной статистической недостоверности результатов [43, 44]) с разной геомагнитной широтой городов, в которых были собраны первичные данные. Чтобы прояснить этот вопрос, был выполнен статистический анализ данных о смертности от сердечно-сосудистых заболеваний, собранных в больницах Санкт-Петербурга, который расположен в той же широтной

зоне, что и Свердловск [74]. Анализ не выявил статистически значимой корреляции между смертностью и уровнем геомагнитной возмущенности и это указывает на то, что упомянутое выше различие результатов не связано с разным широтным местоположением городов, но, скорее всего, зависит от критериев отбора данных. Липпа использовал данные об общей смертности. Гневышев и Новикова брали особые случаи так называемой внезапной смерти, которые выбирались из первичных историй болезни. Отбор данных в [43, 44] не был формализован, поэтому невозможно точно повторить их анализ.

Противоречивые результаты в этой области указывают на то, что влияние геомагнитных возмущений на заболеваемость, по-видимому, очень слабо, если оно вообще существует. Поэтому для выявления таких малых эффектов необходимо повысить статистическую достоверность результатов. Этого можно достичь путем анализа большого количества данных и использования наиболее подходящих индексов геомагнитной активности. При корректном статистическом подходе необходимо также принимать во внимание мультивариационный характер задачи [75, 76]. На рисунке 6 приведена схема, показывающая основные факторы окружающей среды, влияющие на количество патологий: вариации социального происхождения, геомагнитные и метеорологические вариации. Социальные эффекты зависят от местных обычаев и индустриального развития общества и эти факторы обычно являются доминирующими. Некоторые примеры социальных эффектов в медико-статистических данных приведены в [18–20, 33]. На рисунке 7 показана кривая среднего числа уличных травм, нарушений сердечного ритма, гипертоний (Москва) и инфарктов (Ленинград). Во всех данных, кроме инфарктов, наблюдаются заметные пики, связанные с датами советских праздников (день Советской армии 23 февраля, Международный женский день 8 марта, День международной солидарности трудящихся 1 мая, День Победы 9 мая, День Октябрьской социалистической революции 7 ноября). В данных о количестве инфарктов не наблюдается таких четких пиков, кривая имеет исключительно регулярный характер с недельным ритмом социального происхождения; более подробно это обсуждается в разделе 5.2.

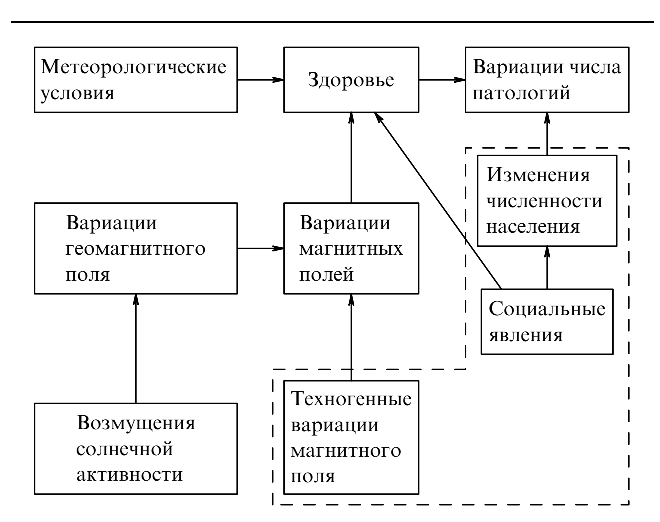


Рис. 6. Основные факторы окружающей среды, влияющие на уровень заболеваемости [19] (в штриховой контур заключены вариации социального происхождения).

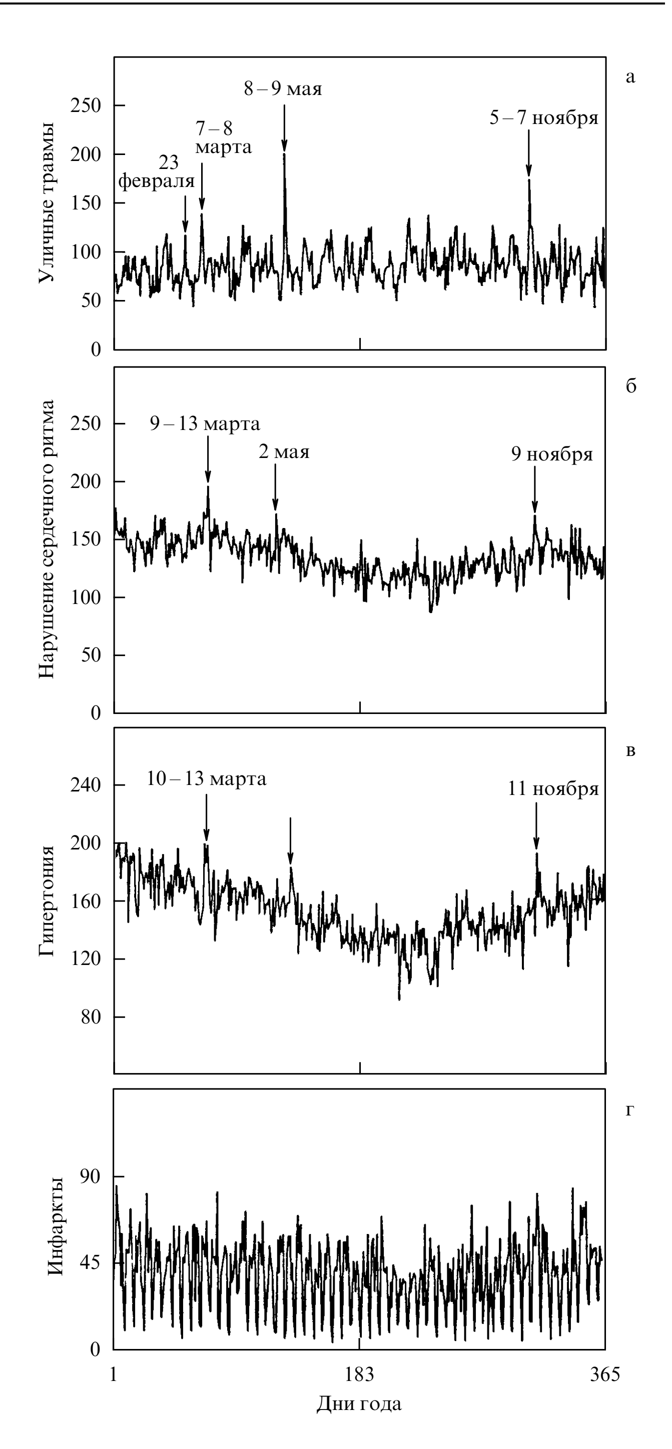


Рис. 7. Изменения в течение года числа патологий в Москве (1979–1981 гг.): (а) уличные травмы (не автомобильные); (б) нарушения сердечного ритма; (в) гипертонии; (г) инфаркты миокарда (Ленинград). На рисунке (а) прослеживается двухмесячная волна, на рис. (г) — недельная вариация [18, 19].

Мы полагаем, что при исследовании возможных эффектов геомагнитных полей в биомедицинских данных необходимо ввести принцип "презумпции невиновности" естественных магнитных полей. Это означает, что прежде всего следует проанализировать возможное влияние всех социальных и техногенных факторов и метеорологических причин и только после этого можно думать о возможной роли геомагнитных полей.

В следующем разделе мы приведем примеры такого подхода к анализу данных, который позволил повысить

надежность результатов [18–20, 33, 74] в противоречивой области биогеомагнитных исследований.

4. Биоэффективные геомагнитные бури и вариации интенсивности космических лучей

Наиболее важной проблемой в биогеомагнитных исследованиях является определение наиболее биоэффективных характеристик геомагнитной активности. Для описания флуктуаций геомагнитного поля разных временных масштабов было разработано несколько геомагнитных индексов, которые рассчитываются по данным наземных измерений поля в геомагнитных обсерваториях. Кроме того для характеристики уровня геомагнитной активности можно использовать некоторые параметры возмущений межпланетной среды, а также вариации интенсивности космических лучей, связанные с межпланетными возмущениями (рис. 8) [77]. Однако в настоящее время не разработан общепринятый механизм взаимодействия между магнитными полями и живыми организмами, поэтому нет критериев для определения того, какие свойства поля опасны для здоровья: амплитуда, частота, волновая форма, продолжительность воздействия и т.д. При такой неопределенности трудно выбрать априори наиболее подходящий индекс. Эта задача концептуально идентична задаче поиска особых характеристик техногенных магнитных полей, которые можно было бы использовать для оценки воздействия магнитного поля. Один из возможных подходов к решению этой задачи предложен в [14, 78]. Этот подход включает в себя две стадии:

а) определение типичных возмущений геомагнитного поля, если они есть, которые можно рассматривать как опасные для здоровья человека;

б) определение биоэффективных параметров таких полей. В этом разделе мы представляем результаты и предложения, связанные с таким подходом. Кроме того мы обсудим возможность предсказания наиболее биоэффективных геомагнитных бурь.

4.1. Медико-статистические данные и форбуш-понижения интенсивности космических лучей, связанные с магнитными бурями

4.1.1. Анализ медицинских данных. Были проанализированы данные ежедневного числа случаев заболеваний некоторыми болезнями в Москве (1979–1981 гг.) [18, 79] и в Ленинграде (1981 г., 1989–1990 гг.) [19, 74] и данные ежедневного числа ДТП в Ленинграде (1987–1989 гг.) [20]. Случаи заболеваний регистрировались службой Скорой медицинской помощи. Все случаи были разделены по группам болезней на основе диагнозов врачей Скорой помощи. В Ленинграде для некоторых групп заболеваний можно было получить данные о подтвержденных в больничных условиях первичных диагнозах Скорой помощи. Были проанализированы следующие данные:

а) в Москве, 1979–1981 гг.: полное число вызовов Скорой помощи (6304000 случаев), инфаркты миокарда (85819), инсульты (98625), гипертония (165699), бронхиальная астма (161617), внезапные смерти (71753), нарушения сердечного ритма (146545), автомобильные травмы (19422), уличные не траспортные травмы (93069), эпилепсии (53613);

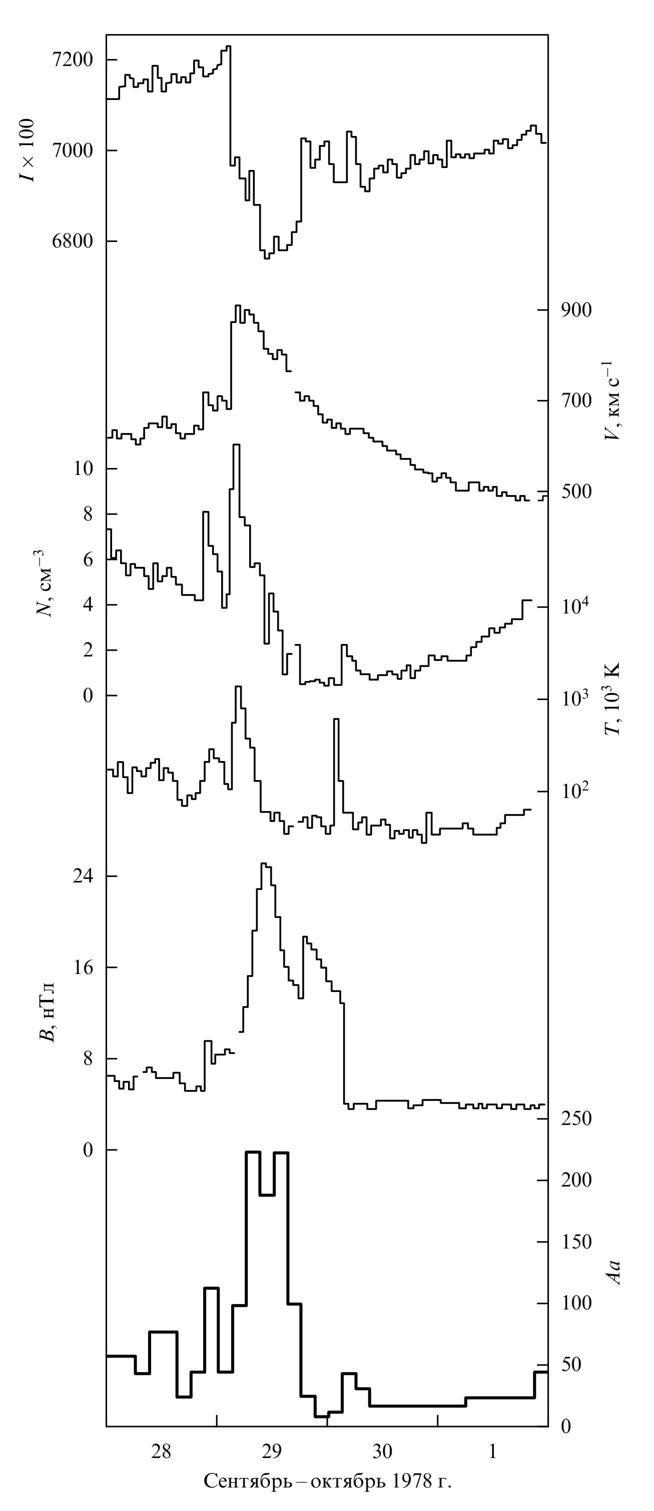


Рис. 8. Кривые нейтронной интенсивности космических лучей I, скорости V, температуры T и плотности протонов N в солнечном ветре, межпланетного магнитного поля B и геомагнитного индекса Aa во время форбуш-понижения в сентябре-октябре 1978 г.

б) в Ленинграде, 1981 г.: полное число вызовов Скорой помощи (1314200 случаев), инфаркты миокарда (14248), подтвержденные инфаркты миокарда (3924), общие травмы (84533), алкогольные травмы (32990), психиатрические вызовы (14067), подтвержденные психиатрические госпитализации (8517); в Ленинграде, 1987–1989 гг.: ДТП (17005); в Ленинграде, 1989–1990 гг.: инфаркты миокарда по данным больниц

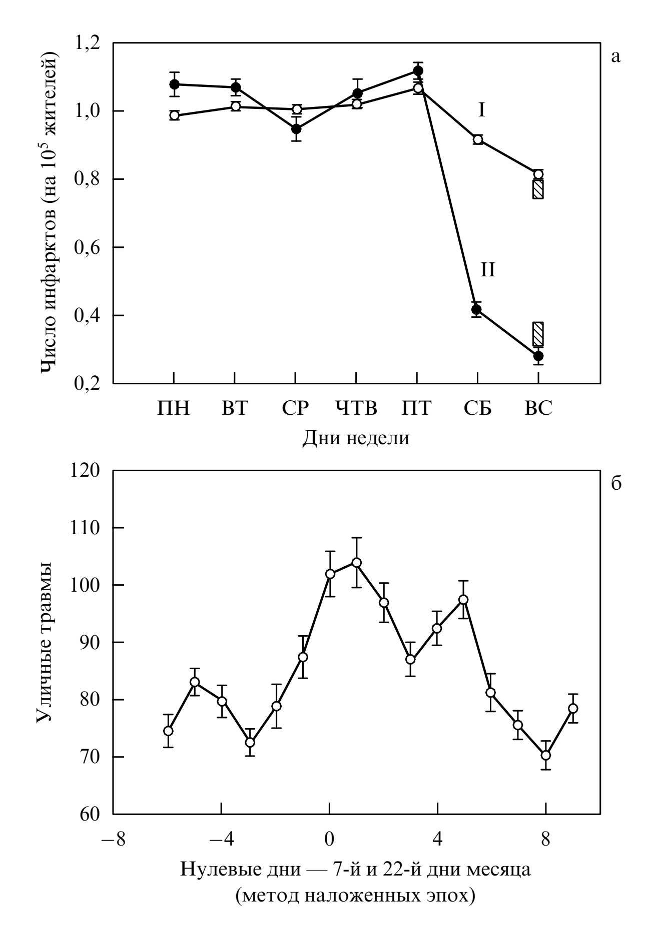


Рис. 9. Недельная вариация числа инфарктов (а) (*I* — Москва, 1979–1981 гг., *II* — Ленинград, 1981 г.) и недельная вариация числа уличных травм (б) (Москва, 1979–1981 гг.). Заштрихованные прямоугольники — средние значения в праздничные дни, не совпадающие с воскресными [18, 19].

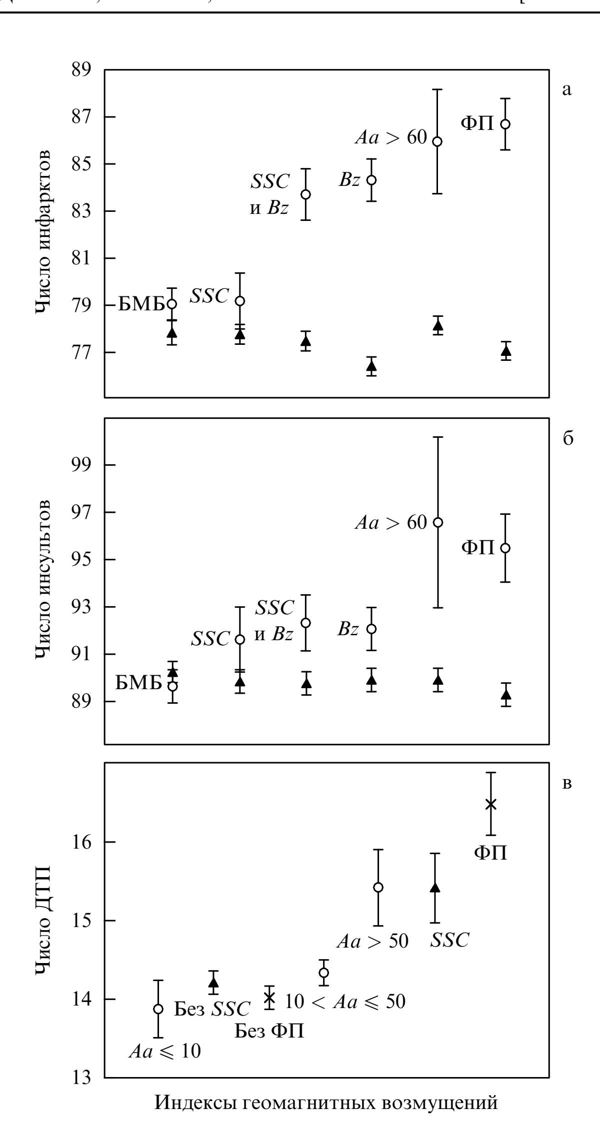


Рис. 10. Среднесуточное число инфарктов (а), инсультов (б) (Москва, 1979–1981 гг.) и ДТП (в) (Ленинград, 1987–1989 гг.) во время магнитных возмущений, определяемых разными индексами геомагнитной активности (БМБ — большие магнитные бури, *SSC* — внезапное начало геомагнитной бури, *Bz* — вертикальная компонента межпланетного магнитного поля, *Aa* — индекс геомагнитной активности, ФП — фаза падения форбуш-понижений космических лучей. Треугольники — среднее по спокойным дням [79, 20]).

(15543), смерти от инфарктов миокарда в больницах (3065).

Большое число доступных для анализа данных позволяет в принципе исследовать малые вариации. При исследовании малых эффектов геомагнитных бурь необходимо очистить данные от больших периодических вариаций социального и метеорологического происхождения.

В рядах данных о различных патологиях часто наблюдается три основных рекуррентных вариации: годовая, 15,3-дневная и 7-дневная. Годовая вариация связана с изменением метеорологических условий и/или численности населения; 15,3-дневная вариация обусловлена полумесячным сигналом, наиболее вероятно, связанным с выплатой зарплаты два раза в месяц; 7-дневная периодичность обусловлена очень стабильным не синусоидальным сигналом, связанным с недельным ритмом социальной жизни; минимальные значения обычно приходятся на воскресные и праздничные дни. Пример недельной вариации приведен на рис. 9. Процедура обработки данных была основана на оценке средних амплитуд и фаз рекуррентных вариаций социального и метеорологического происхождения и исправлении данных за эти вариации.

4.1.2. Корреляция с геомагнитными индексами. Данные, очищенные от годовой, недельной и полумесячной вариаций были сопоставлены с межпланетными возмущениями, описываемыми различными индексами магнитосферной и геомагнитной активности. Было установлено, что только в данных об инфарктах миокарда, инсультах и ДТП обнаруживается некоторая связь с геомагнитными возмущениями. На рисунке 10 показаны полученные результаты для разных индексов геомагнитных возмущений. Видно, что разные уровни геомагнитной активности соответствуют разным уровням числа патологий. Наиболее заметные и статистически значимые эффекты наблюдаются, как правило, в геомагнитно-возмущенные дни, которые определялись как дни, совпадающие с фазой падения форбуш-понижений (ФП) интенсивности космических лучей. В таблице 1 приведено отношение числа инфарктов, инсультов и ДТП в дни с ФП к их числу в дни без ФП и вероятность того, что распределение данных в дни с ФП может быть получено как случайная выборка из общей совокупности данных.

Таблица 1

Показатель	A,* %	$Б$,** %
Инфаркты, Скорая помощь, Ленинград, 1981 г.	$14{,}0 \pm 5{,}5$ ($P = 2 \times 10^{-2}$)	
Инфаркты, Скорая помощь, Москва, 1979–1981 гг.	$12{,}5 \pm 1{,}5$ ($P = 10^{-10}$)	$10{,}5 \pm 1{,}2$
Инфаркты, Ленинград, 1989–1990 гг.	$6{,}5 \pm 2{,}0$ ($P = 2 \times 10^{-3}$)	
Инсульты, Скорая помощь, Москва, 1979–1981 гг.	$7{,}0 \pm 1{,}7$ ($P = 10^{-4}$)	$7{,}0 \pm 1{,}7$
ДТП, Скорая помощь, Ленинград, 1987–1989 гг.	$17{,}4 \pm 3{,}1$ ($P = 7 \times 10^{-7}$)	$17{,}4 \pm 3{,}1$

* A — отношение числа инфарктов, инсультов и ДТП в дни с ФП к их числу в дни без ФП.
** $Б$ — среднее число инфарктов, инсультов и ДТП в дни с ФП по отношению к дням без ФП.

Видно, что в геомагнитно-возмущенные дни, определяемые по интенсивности космических лучей, среднее число инфарктов, инсультов и ДТП увеличивается соответственно в $1{,}105 \pm 0{,}012$, $1{,}070 \pm 0{,}017$ и в $1{,}174 \pm 0{,}031$ раза.

4.2. Число инфарктов и ДТП во время форбуш-понижений

В работе [80] рассмотрены более подробно эффекты в данных о заболеваемости во время развития форбуш-понижений (ФП). Все ФП были разделены на три группы по продолжительности T фазы падения ФП: первую группу составили ФП с $T < 1$ дня, вторую — с $1 < T < 2$ дня, третью — с $2 < T < 3$ дня, затем было подсчитано число инфарктов и ДТП в дни, начиная с первого до начала каждого ФП и кончая пятым днем после каждого ФП. На рисунке 11 приведены результаты этих вычислений только для первой и второй группы ФП, так как в третьей группе оказалось очень мало событий. Для первой группы среднее число инфарктов и ДТП возрастает только в первый день ФП и никаких эффектов не наблюдается в период фазы восстановления ФП (которая обычно длится несколько дней). Для второй группы ФП наблюдается увеличение числа случаев только в течение двухдневного периода фазы падения ФП. Эти результаты можно понять, если принять во внимание общепринятый механизм образования ФП (см., например, [81]). Фаза падения ФП наблюдается, когда Земля пересекает область межпланетного пространства, характеризующуюся сильными возмущениями скорости солнечного ветра, плотности плазмы и вмороженного в солнечную плазму магнитного поля (межпланетные ударные волны, разрывы в потоке солнечной плазмы, выброшенные из короны магнитные облака и т.п.), которые генерируются солнечными вспышками (см. рис. 8). Продолжительные возмущения (более 1 дня) часто связаны с более чем одной солнечной вспышкой. Межпланетные возмущенные области, взаимодействующие с земной магнитосферой, вызывают большие геомагнитные бури и флуктуации геомагнитного поля в широкой полосе частот. Когда возмущенная область солнечной плазмы с вмороженным магнитным полем обтекает Землю, интенсивность космических лучей начинает восстанавливаться за счет диффузии частиц из невозмущенных областей межпланетного пространства. В потоке солнечной плазмы между генерированной

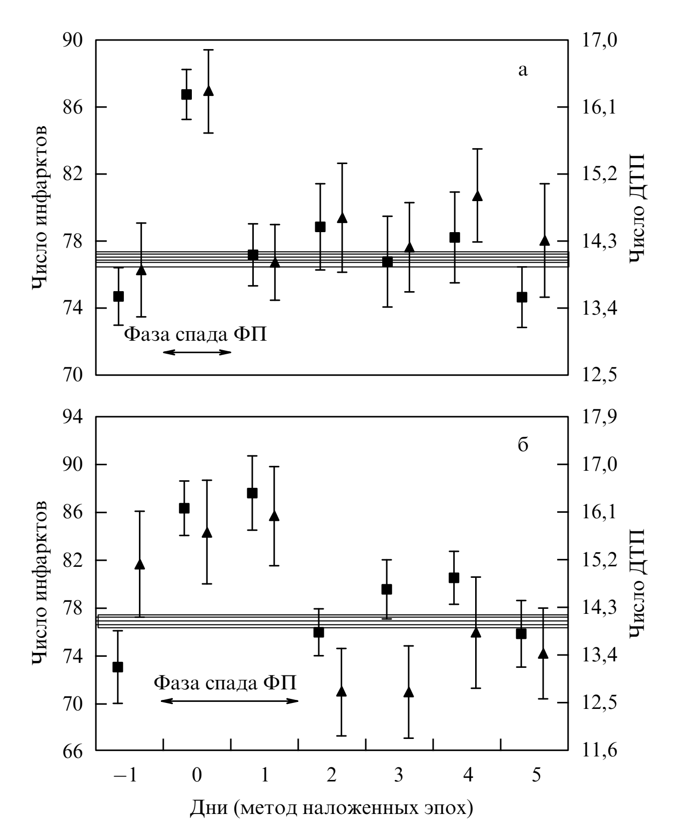


Рис. 11. Среднее число инфарктов (прямоугольники, Москва, 1979–1981 гг.) и ДТП (треугольники, Ленинград, 1987–1989 гг.) во время развития форбуш-понижений с разной продолжительностью фазы падения T: (а) $T < 1$ дня (25 ФП с инфарктами, 55 — с ДТП); (б) $1 < T < 2$ (30 ФП с инфарктами, 30 — с ДТП). Заштрихованная полоса — значения в спокойные дни (не относящиеся к фазе падения ФП) [80].

вспышкой возмущенной областью и Солнцем существуют спокойные условия и, когда эта спокойная область достигает Земли, не наблюдается больших геомагнитных возмущений. Поэтому понятно, почему связь между ФП и количеством некоторых патологий обнаруживается только во время фазы падений ФП. Следует подчеркнуть, что ФП являются в данном случае всего лишь индикаторами специфических магнитных бурь, характеризующихся особыми биоэффективными вариациями геомагнитного поля. Иными словами, ФП, по-видимому, могут помочь отличить эту особую категорию опасных для здоровья геомагнитных бурь от бурь других типов.

4.3. Предсказание биоэффективных геомагнитных бурь с помощью космических лучей

В предыдущем разделе мы пришли к выводу, что число инфарктов миокарда, инсультов, а также ДТП обнаруживают статистически значимое увеличение в период геомагнитных бурь особого типа. Индикаторами этих биоэффективных геомагнитных возмущений являются форбуш-понижения интенсивности космических лучей и наиболее опасные для здоровья дни соответствуют фазе падения ФП. Если примем во внимание, что средняя продолжительность фазы падения ФП равна $\sim 1{,}5$ дня, то для каждого ФП среднее увеличение числа патологий, как можно ожидать, будет равно 15 % для инфарктов, 10 % для инсультов и 25 % для ДТП. Абсолютное число включенных в этот круг людей будет довольно большим

вследствие того, что геомагнитные бури охватывают весь земной шар. Кроме того, хорошо известно, что геомагнитные бури отрицательно влияют на высокотехнологичные системы [82, 83]. Поэтому важно развить методы, предсказывающие появление больших ФП. Анализируя данные по космическим лучам, можно "видеть" движущиеся магнитные облака и межпланетные ударные волны за 15 – 20 ч до того, как они достигнут Земли, измерить их скорость и другие параметры и предсказать с высокой степенью достоверности, будет ли наблюдаться на Земле магнитная буря, ожидаемое время ее начала и возможную интенсивность и продолжительность. В этом случае можно было бы принять соответствующие превентивные меры по профилактике сердечно-сосудистых заболеваний у людей, находящихся в группе риска, меры по усилению безопасности дорожного движения и по защите технологических устройств.

Основные особенности изменения интенсивности космических лучей, которые могут быть использованы для предсказания ФП, таковы ([80, 84] и ссылки там):

а) возрастание интенсивности космических лучей перед началом ФП [85, 86]. Открытие этого эффекта способствовало развитию теории [87, 88], дальнейший анализ [89, 90] показал, что этот эффект вызывается взаимодействием и ускорением частиц на межпланетных ударных волнах;

б) понижение интенсивности космических лучей до начала ФП [91, 92]. Этот эффект был недавно исследован как теоретически [89], так и экспериментально по данным мировой сети данных [90]. Эффект предпонижения может быть обусловлен тем, что Земля находится на одной магнитной силовой линии с движущейся от Солнца областью пониженной интенсивности космических лучей и эта пониженная плотность вдоль магнитной силовой линии может наблюдаться на Земле [93 – 97];

в) флуктуации интенсивности космических лучей перед ФП. Ряд авторов показали, что существуют особенности флуктуаций космических лучей перед ФП: изменения в частотном спектре, появление в спектре пиков на некоторых частотах, изменения некоторых спектральных параметров, характеризующих флуктуации [98, 99]. Полученные результаты часто противоречат друг другу. Иногда кажется, что флуктуации космических лучей вполне могут служить основанием для предсказания ФП согласно теории альфвеновской турбулентности, которая вызывается кинетической неустойчивостью потока низкоэнергичных частиц, ускоренных ударными волнами [100]; иногда это предположение кажется неправомочным [80].

Происхождение всех этих явлений известно, однако адекватные математические модели еще не развиты. Экспериментальный анализ этих эффектов очень труден из-за их малой амплитуды и малой продолжительности. Теоретические исследования также затруднены из-за их сложности. Для практической реализации предсказаний на основе описанных эффектов необходимо получать данные с большинства станций космических лучей в реальном масштабе времени (в настоящее время данные доступны спустя лишь несколько месяцев).

5. Биомедицинские эффекты искусственных УНЧ – КНЧ электромагнитных полей

Биологические эффекты искусственных ультранизкочастотных (УНЧ: 0,001 – 10 Гц) и крайненизкочастотных (КНЧ: 10 – 300 Гц) магнитных полей исследовались на нескольких уровнях: на уровне организма человека (в основном, эпидемиологические исследования), в экспериментах на животных и на клеточном уровне.

5.1. Эпидемиологические исследования

В 1960-х годах появились сообщения о таких симптомах, как головная боль, утомляемость, боли в области сердца, головокружение, бессонница у людей, работающих на силовых подстанциях и подвергающихся воздействию низкочастотных электрических и магнитных полей в течение рабочего дня. Начиная с 1979 г. с исследований Вельтхаймер и Липера [101] появилось большое число работ, касающихся связей между повышенным уровнем электромагнитных полей на работе и дома и увеличением числа онкологических заболеваний среди детей и взрослых (см. обзоры [3, 4, 9, 102, 103]).

Наблюдаемые эффекты, выявленные при многочисленных биомедицинских эпидемиологических исследованиях, представлены в табл. 2. Однако можно найти не меньшее число работ, в которых не найдено таких связей (см., например, обзоры [1, 2, 128]). В частности, не выявлено какой-либо корреляции между числом острых

Таблица 2

Источники, характеристика магнитных полей (МП)	Наблюдаемые эффекты	Литература
Силовые подстанции, 50 Гц	Головная боль, утомляемость, боли в сердце, головокружение, бессонница у работающих на силовых подстанциях	[104 – 107]
Промышленные МП, 50, 60 Гц	Утомляемость, сильная головная боль, депрессии, самоубийства	[108 – 113]
Импульсные электромагнитные поля, 60 Гц	Повышенная смертность из-за несчастных случаев у работающих с импульсными полями	[113]
Линии электропередач (ЛЭП), 50, 60 Гц	Увеличение числа сердечно-сосудистых заболеваний у проживающих вблизи ЛЭП;	[106]
	повышенный (в 1,5 – 3 раза) риск заболеваний лейкемией, опухолью мозга у проживающих вблизи ЛЭП	[114 – 117]
Повышенный уровень электромагнитных полей на рабочем месте	Повышенный риск заболеваний некоторыми формами лейкемии, опухолью мозга, раком груди у мужчин для некоторых "электрических" профессий	[112, 113, 118 – 121]
МП от трамваев	Повышенный риск заболеваний раком груди у мужчин — трамвайных рабочих	[122]
МП от электропоездов (переменный ток, 16,67 Гц)	Повышенный (в 2 – 3 раза) риск заболеваний лейкоцитарной лейкемией у машинистов и у кондукторов	[123, 124]
	Повышенная (в 2 раза) вероятность смерти от лейкемии у машинистов электропоездов	[125, 126]
МП от электропоездов (постоянный ток)	Повышенный риск заболеваний сердечно-сосудистой системы у работающих на железной дороге	[13, 14, 127]

инфарктов миокарда и интенсивностью измеренных в местах проживания магнитных полей на частоте 50 Гц [129].

Главным недостатком многих эпидемиологических работ было отсутствие измерений реальных магнитных полей. Оценка воздействия полей на население была основана на "коде проводника", на условной классификации, разработанной исследователями для описания величины и конфигурации распределения окружающих электрических линий и расстояния до этих линий. При исследовании оценки воздействия полей на людей разных профессий в процессе их деятельности основывались, главным образом, на названиях профессий. В последнее время стали появляться данные прямых измерений магнитных полей в местах обследований, однако оценка воздействия все еще остается слабым местом исследований в области возможного влияния магнитных полей на здоровье человека (см. раздел 7.2).

5.2. Биологические исследования

Результаты эпидемиологических исследований определили области биологического изучения биоэффектов слабых УНЧ – КНЧ электрических и магнитных полей *in vivo* и *in vitro*. Наиболее значительные биологические эффекты, наблюдаемые в организме человека и животных, подвергавшихся воздействию электрических и магнитных полей, по-видимому, непосредственно или опосредовано связаны с нервной системой. Эта связь очевидна, так как нервная система состоит из таких тканей и в ней протекают такие процессы, которые очень чувствительны к электрическим сигналам. К тому же как структура, так и функции нервной системы включены в процесс взаимодействия живых организмов с окружающей средой.

В таблице 3 суммированы эффекты, наблюдаемые при воздействии КНЧ – УНЧ магнитных полей на добровольцев, лабораторных животных или на ткани. Никакого влияния магнитных полей на кровяное давление не было обнаружено [132, 138]. В целом эти исследования свидетельствуют о том, что нервная и сердечно-сосудистая системы, по-видимому, весьма восприимчивы к низкочастотным магнитным полям.

Никаких доказательств непосредственного влияния электрического или магнитного поля на мутагенез или канцерогенез при исследовании на животных (*in vivo*), подвергавшихся воздействию синусоидальных полей с частотой 60 Гц, пока не найдено (см., например, [5]). Однако рост опухолей задерживался в некоторых экспериментах, когда животные подвергались воздействию импульсных магнитных полей [150].

Был предложен и другой подход в связи с канцерогенезом: электромагнитное поле рассматривается как агент, усиливающий первоначальную причину (химическое воздействие или ионизирующее излучение) (см. обзоры [5, 10]). Например, недавно в [151, 152] показано, что воздействие электромагнитных полей может ускорять развитие рака у животных, которые подвергались действию химических канцерогенов.

Все больше исследователей, ведущих исследования на клеточном уровне, приходят к мнению, что взаимодействие с полями происходит на клеточной мембране ([10, 153, 154] и ссылки там). Оказалось, что на клеточной мембране имеет место преобразование сигнала и что многие эффекты, наблюдаемые при исследованиях на культурах клеток, могут быть следствием изменений в мембранных ионных каналах или рецепторах [155].

5.3. Результаты, связанные с биоэффективными характеристиками магнитных полей

Мы сосредоточим внимание на следующих новых результатах биологических исследований, которые могут оказаться важными при определении биоэффективных параметров как естественных, так и искусственных магнитных полей.

а) Эффекты "окон". Многие результаты свидетельствуют о том, что биологические эффекты магнитных полей имеют место только при особом сочетании частот и амплитуд и во многих случаях зависят от направления поля по отношению к полю Земли. Это так называемый эффект "окон" (см., например, [3, 39, 153, 156]).

б) Ультранизкочастотная (УНЧ) область. В некоторых случаях, особенно когда затронута нервная и сердечно-сосудистая системы, биологические эффекты более ярко проявляются при воздействии УНЧ полей,

Таблица 3

Характеристики МП	Наблюдаемые эффекты	Литература
КНЧ – УНЧ МП 40 мкТл – 1,3 мТл	Изменения энцефалограмм у человека и животных	[130, 131]
МП 50 Гц, 100 мкТл	Уменьшение времени реакции, отсутствие реакции сердечно-сосудистой системы человека	[132]
МП 5 Гц	Ухудшение вербальной памяти	[133]
МП 0,2 Гц, 0,5 – 1,1 мТл	Увеличение времени реакции человека	[134]
МП 50 Гц, модулированные частотой 1 Гц, 40 мкТл – 1,26 мТл	Ухудшение способности к обучению	[131, 135]
Электрические и МП (9 кВ $м^{-1}$, 20 мкТл)	Замедление сердечного ритма человека	[111, 136, 137]
МП 60 Гц, 20 мкТл	Снижение изменчивости сердечного ритма человека	[138, 139]
МП 60 Гц, 10 Гц	Улучшение функций памяти у крыс	[140, 141]
МП 60 Гц, 50 мкТл	Ухудшение решения задач у крыс	[142]
МП 50 Гц, 2 Тл	Стимуляция деятельности сердца у собак в диастолической фазе	[143]
Переменные МП, индуцирующие токи более 1 А $м^{-2}$	Нервное возбуждение, необратимые биологические эффекты, такие как фибрилляция сердца	[144 – 146]
КНЧ МП с величинами, типичными для геомагнитных возмущений	Ускорение сердечного ритма у голубей	[147]
Импульсные МП с разной частотой повторения (4,5 – 50 Гц, 10 мТл)	Ускорение ритма сердечной ткани крыс и собак, аритмия на некоторых частотах	[148]
Электромагнитные поля 8 Гц, 1 В $м^{-1}$	Более интенсивное развитие инфарктов у кроликов	[149]

чем при воздействии более высокочастотных полей [157]. Например, пороговые значения интенсивности поля, при которых наблюдались нейрофизиологические эффекты у обезьян, были разными на разных частотах: для УНЧ полей с частотой 7 Гц порог ниже, чем для КНЧ полей с частотами 60 и 75 Гц [158]. Авторы связывают этот результат с тем фактом, что УНЧ поля находятся в области частот нормальной волновой активности мозга. Последние исследования влияния полей на специфическую активность мозга, известную как медленная ритмическая активность (тета-ритм), которая проявляется в 7 – 15-секундных импульсах, показывают, что магнитное поле с частотой 1 Гц (56 и 560 мкТл, но не 5,6 мкТл) вызывало необратимую дестабилизацию тета-ритма в тканях мозга крыс [159]. Эксперименты с полями на частоте 60 Гц не дали статистически значимых результатов. Также было показано, что поля с интенсивностью 0,01 Тл (с частотами 4,5 – 6 Гц, 20 – 25 Гц и 40 – 45 Гц) могут изменять спонтанные ритмы миокарда млекопитающих (крыс, собак): при этом, чем больше масса сердца, тем меньше эффективная частота импульсного магнитного поля [148].

Изучение некоторых параметров кровеносной системы крыс, подвергавшихся воздействию магнитных полей с частотами, лежащими в пределах 0,01 – 100 Гц (0,005; 0,05 и 5 мкТл), показало, что биоэффекты в основном наблюдаются на частотах ниже 12 Гц. В частности, было обнаружено, что магнитные поля с частотами 0,02; 0,5 – 0,6; 8 – 11 Гц были наиболее биоэффективны [157]. Проведенные на добровольцах специальные исследования [160], в которых частоты менялись от 1 до 75 Гц (0,001 – 0,75 мТл), показали, что чувствительность к магнитным полям была наиболее выраженной на частоте 10 Гц.

в) Иррегулярные волновые формы, переходные процессы, скачки. Исследования, проведенные на людях [131, 138, 160], а также ряд других исследований (см., например, [161]) говорят о том, что скачкообразные поля (т.е. изменения устойчивого состояния поля) и иррегулярные волновые формы полей биологически более эффективны, чем устойчивые поля с регулярной синусоидальной формой волн. Например, эффекты воздействия поля на длительность интервалов между ударами сердца [111] и на электроэнцефалограмму у людей [131] были более явными, когда испытуемые подвергались воздействию скачкообразных магнитных полей, по сравнению с воздействием устойчивых полей с той же плотностью магнитного потока. В [162, 163] сообщается о нарушении у крыс ночного повышения уровня гормона мелатонина, обусловленном внезапными сменами направлений постоянного магнитного поля и импульсными магнитными полями. Прерывистые, скачкообразные магнитные поля могут вызвать более сильные эффекты, так как испытуемый может быть более чувствителен к переходным процессам, создаваемым при включении или выключении поля [132]. Действительно, на основе исследований смертности среди телефонистов было установлено, что работающие в такой профессиональной окружающей среде, которая характеризуется высокими скачкообразными пиками интенсивности и быстрыми изменениями направлений магнитных полей, подвергаются более высокому риску заболевания лейкемией, чем те, кто подвергается воздействию полей с постоянным уровнем интенсивности [120].

Таким образом, есть доказательства, полученные, в основном, при исследовании функций центральной нервной системы, электроэнцефалограмм и сердечного ритма, что поля в УНЧ диапазоне (0 – 10 Гц) и переходные процессы могут быть более биологически значимы, чем преимущественно синусоидальные поля от ЛЭП на частотах 50 – 60 Гц.

6. Транспортные магнитные поля и сердечно-сосудистые болезни

В разделе 5 было показано, что по крайней мере нервная и сердечно-сосудистая системы довольно чувствительны к резким изменениям амплитуды и направления магнитного поля, а также к вариациям в диапазоне частот ниже 15 Гц. В разделе 2 мы выяснили, что эти характеристики типичны для естественных вариаций геомагнитного поля, которые представляют собой сложную суперпозицию вариаций с разными амплитудами и частотами, лежащими преимущественно в УНЧ области (см. рис. 2). В данном разделе мы рассмотрим техногенные источники таких иррегулярных полей в нашем окружении.

6.1. Техногенные магнитные поля УНЧ диапазона в окружающей среде: поля от электротранспорта

6.1.1. Временные и пространственные характеристики УНЧ магнитных полей в окружающей среде. Измерения, выполненные в [28, 164], показали, что работающая на постоянном токе скоростная транспортная система в бухте Сан-Франциско (San Fransisco Bay Area Rapid Transit System) BART была мощным генератором УНЧ магнитных полей, регистрируемых повсюду в регионе бухты (100 км). Первичным источником была большая токовая петля, образованная третьим рельсом, поездами BART, токоприемниками и подстанциями, дающими постоянный ток. Магнитное поле, измеренное в 100 м от железнодорожной колеи имело преимущественно вертикальное направление и характеризовалось иррегулярными вариациями, однако можно было различить периодические всплески с частотами 0,002 – 0,003 Гц, которые хорошо соотносились с расписанием поездов (рис. 12, верхний график). Амплитуды поля в среду 29 марта были гораздо больше, чем соответствующие амплитуды в воскресенье 26 марта 1978 г., когда система BART не работала в период проведения измерений поля. В воскресенье 26 марта геомагнитная активность была умеренной ($Ap = 14$), а в среду 29 марта и в четверг активность была высокой ($Ap = 49$ и 70), так как геомагнитная буря началась 26 марта. Имея в виду эту информацию, авторы [28, 164] пришли к выводу, что BART увеличила амплитуды УНЧ магнитных полей на 2 – 3 порядка.

Чтобы определить особенности, динамику и распределение УНЧ магнитных полей в большом индустриальном городе, был выполнен специальный мониторинг магнитных полей в окружающей среде Санкт-Петербурга в частотном диапазоне 0,001 – 10 Гц [19, 33]. Измерения были сделаны в центральной части города в январе – феврале 1994 г. на расстоянии примерно 100 м от трамвайных путей и линии метро (рис. 13) и показали, что техногенные магнитные поля в этом частотном диапазоне создаются, в основном, трамваями и поездами метро, работающими на постоянном токе. Оказалось, что максимальные амплитуды техногенных полей

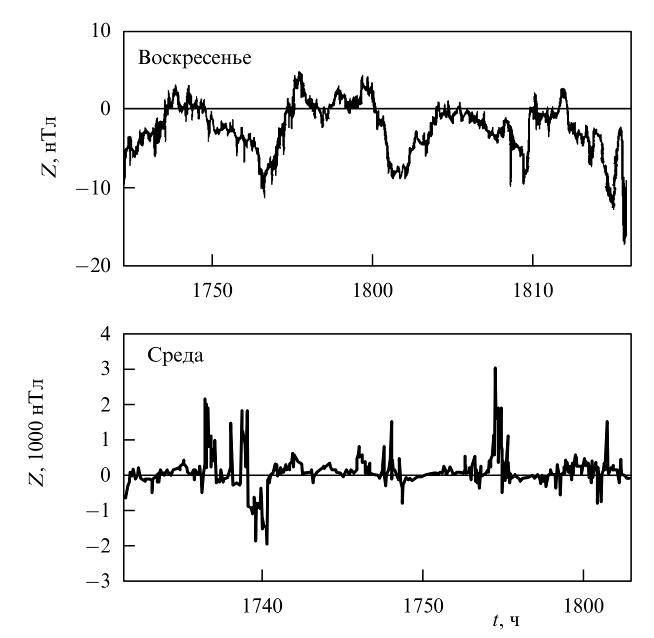


Рис. 12. Вариации вертикальной компоненты геомагнитного поля на ст. Лейни Колледж в воскресенье 26 марта 1978 г. (BART не работала) и в среду 29 марта 1978 г. (BART работала) в частотном диапазоне 0,001 – 4 Гц [28] (следует обратить внимание на разные шкалы).

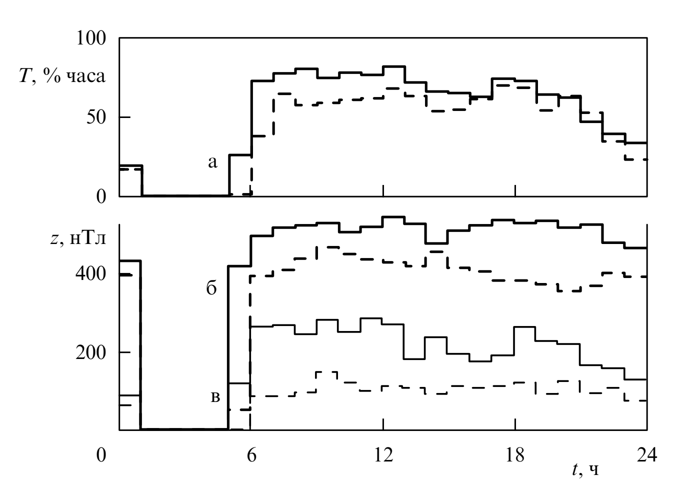


Рис. 13. Суточные изменения характеристик вертикальной компоненты магнитного поля, измеренного в центральной части Санкт-Петербурга в рабочие дни (сплошная линия) и в воскресные дни (штриховая): (а) появление пиков в области частот 0,05 – 0,2 Гц, (б) их средняя амплитуда, (в) средняя амплитуда медленных вариаций (0,0013 – 0,005 Гц) [19]. T, % — время, в течение которого наблюдались пики.

связаны с проходящими трамваями и наблюдаются в Z-составляющей. Наиболее заметные сигналы выглядят как пики в Z-компоненте в области частот 0,05 – 0,2 Гц с амплитудами, достигающими 1 мкТл. Эти пики появляются часто в виде серий продолжительностью 3 – 30 мин и в общем выглядят как естественные пульсации $Pc2 - Pc3$, но с гораздо большей амплитудой. Например, они в $10^3 - 10^4$ раза больше пульсаций $Pc2 - Pc3$, наблюдаемых во время умеренной геомагнитной активности ($K = 3$).

Второй тип наиболее заметных флуктуаций, наблюдаемых в Z-составляющей, состоит из длительных периодов (200 – 800 с) повышенных амплитуд поля. Эти долгопериодные "волны" схожи с естественными геомагнитными пульсациями $Pc5$, $Pc6$, $Pi3$ (с частотами ниже 0,005 Гц) и могут достигать значения 0,5 мкТл.

В целом транспортные УНЧ магнитные поля, зарегистрированные на расстоянии примерно 100 м от транспортных магистралей, на записях похожи на естественные магнитные поля во время геомагнитных возмущений. Амплитуды флуктуаций магнитного поля во время больших геомагнитных бурь, вызванных межпланетными возмущениями, могут достигать 0,4 – 0,5 мкТл на широте Санкт-Петербурга. Интенсивность транспортных магнитных полей уменьшается с увеличением расстояния от источников и достигает на расстояниях 50 – 100 м такого же порядка величины, как и естественные вариации магнитного поля.

6.1.2. Магнитные поля в электропоездах и вблизи них

а) Общие характеристики. В последние годы был выполнен ряд работ по измерениям магнитных полей от электротяги. Измерения проводились в традиционных электропоездах и в современных высокоскоростных поездах типа MAGLEV (магнитная левитация). Первоначально для измерения магнитных полей, в основном, использовались приборы, чувствительность которых лежала в относительно узкой полосе частот, центрированной либо на 50 (60) Гц, либо на другие специфические частоты (например, 16,67 Гц). С помощью этих приборов успешно измеряли синусоидальные магнитные поля от ЛЭП, промышленных и бытовых установок. Недавно стали использовать усовершенствованные магнитометры типа Multiwave [154, 165], с помощью которых обнаружили, что магнитные поля от электротяги значительно сложнее, чем поля вблизи ЛЭП. Они имеют сложный частотный спектр, весьма изменчивый во времени. Обычно основные частотные компоненты транспортных полей ниже 15 Гц [165]. В вагонах высокоскоростной транспортной магистрали MAGLEV-TR07 около 80 % изменений поля приходится на частотную область ниже 47,5 Гц [11].

Амплитуды полей весьма различны в разных частотных диапазонах в транспортных системах разных стран, они также сильно варьируют в зависимости от точки измерения. Измерения полей на частоте 16,67 Гц [166], выполненные на платформе непосредственно над контактным проводом, показали, что амплитуды магнитных полей составляют 10 – 20 мкТл во время прохождения поезда, работающего на переменном токе (Германия). Магнитные поля, измеренные в последнем вагоне поезда Amtrak в США, имеют амплитуды до 30 мкТл на частоте 60 Гц и до 65 мкТл на частоте 25 Гц [24]. Измерения, выполненные в локомотивах Швейцарской железнодорожной системы, работающей на переменном токе с частотой 16,67 Гц, показали, что в современных локомотивах максимальные магнитные поля имеют интенсивность менее 200 мкТл, в более старых локомотивах максимальные поля лежат в пределах 1640 – 6170 мкТл [167]. В Швеции в локомотивах электропоездов (переменный ток 16,67 Гц) были зарегистрированы флуктуации магнитного поля от 0,5 мкТл до более чем 100 мкТл в диапазоне частот 10 –1000 Гц [168]. В Британии в электропоездах, работающих на постоянном токе, наблюдались статические магнитные поля в пределах 16 – 64 мкТл и вплоть до 15 мТл, переменные магнитные поля регистрировались в пределах 5 – 50 мкТл

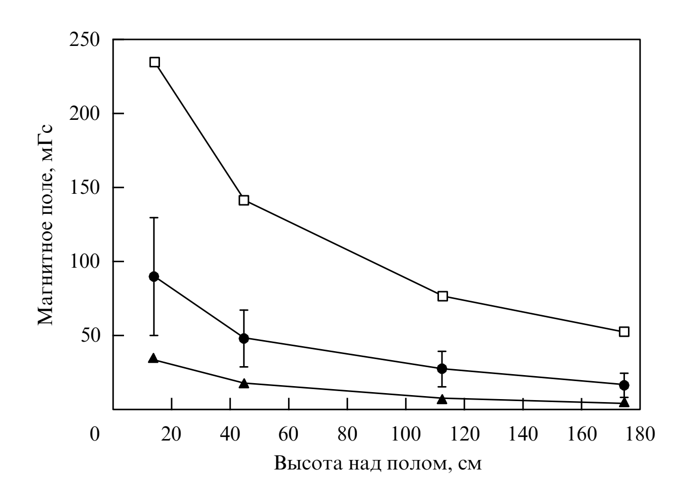


Рис. 14. Минимальные (▲), средние (●) и максимальные (□) магнитные поля (5–45 Гц), измеренные в пассажирских купе поезда MAGLEV-TR07 на разных уровнях от пола [11].

на частоте 50 Гц и вплоть до 15 мТл — на частоте 100 Гц вблизи оборудования [34]. Измерения, проведенные в Японии, дали следующие результаты: подстанции — 0,3–3 мкТл; железнодорожные станции — 0,2–10 мкТл; поезд (на постоянном токе) — 0,5–5 мкТл (постоянное поле 50–200 мкТл); поезд (на переменном токе) — 0,2–150 мкТл (постоянное поле 100–4000 мкТл); поезд (на постоянном и переменном токе) — 0,5–75 мкТл (постоянное поле 200–1000 мкТл); локомотив (на постоянном и переменном токе) — менее 4 мкТл (постоянное поле 50 мкТл). Максимальные значения полей вблизи оборудования и питающихся током устройств были в несколько раз больше приведенных выше значений [35].

В пассажирских купе MAGLEV-TR07 средние уровни интенсивности полей находятся в пределах от ~ 10 мкТл вблизи пола вагона до ~ 2 мкТл — на уровне головы стоящего человека [11]. За исключением сильной зависимости от высоты (рис. 14) магнитные поля не очень сильно меняются внутри пассажирского купе.Уровень постоянного поля вблизи пола составлял ~ 80 мкТл и уменьшался до 50 мкТл на высоте головы стоящего человека. Статические поля более изменчивы пространственно, но более стабильны во времени, чем переменные поля. На платформе переменные магнитные поля, генерируемые проходящими поездами, составляли ~ 2 мкТл.

б) УНЧ диапазон. Приведем результаты магнитных измерений в УНЧ диапазоне в российских электропоездах [13, 14, 129]. Измерения были выполнены с помощью специальной компьютеризированной магнитометрической системы, разработанной в санкт-петербургском филиале ИЗМИРАН (Россия) и позволяющей регистрировать и записывать магнитные поля в частотной области 0–200 Гц. Особое внимание было уделено магнитным полям в УНЧ (0–10 Гц) диапазоне по следующим причинам: во-первых, УНЧ диапазон слабо изучался в прошлом; во-вторых, как показывают биологические исследования, эта частотная область может иметь важное биологическое значение; в-третьих, вариации естественного геомагнитного поля в УНЧ диапазоне обнаруживают связь с сердечно-сосудистыми заболеваниями, инфарктами и ДТП (см. раздел 4).

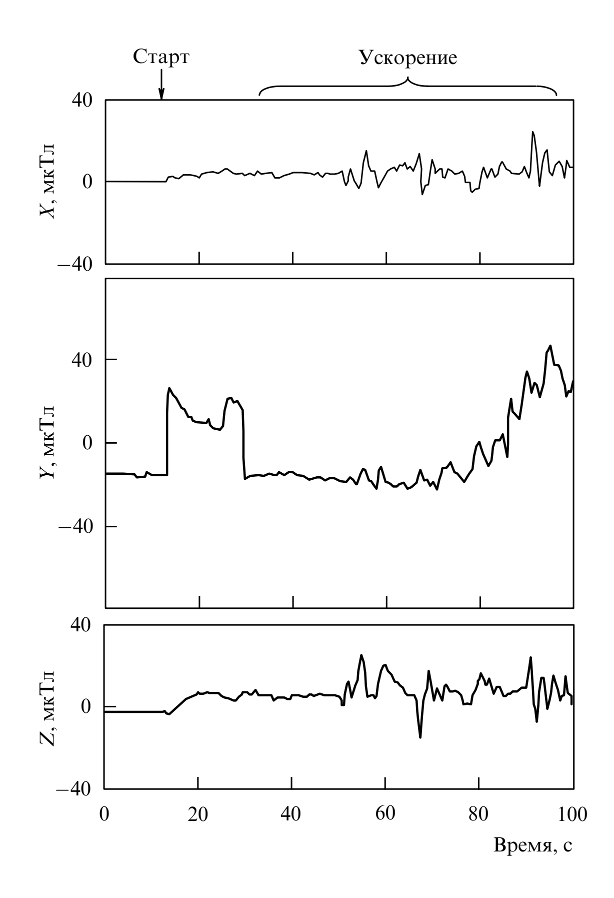


Рис. 15. *X*-, *Y*-, *Z*-компоненты УНЧ магнитного поля в кабине машиниста движущейся электрички, питающейся постоянным током [14].

Измерения были проведены в электролокомотивах (ЭЛ) и электричках, работающих на постоянном токе. Электрички (мотор-вагонные секции (МВС)) состоят из ряда вагонов с моторами и вагонов без моторов, при этом вагон, где находится кабина машиниста, не имеет мотора. Оба типа поездов питаются от линии с напряжением 3000 В, расположенной над поездом, возвратный ток течет через рельсы. Измерения трех составляющих магнитного поля (X, Y — горизонтальные, ориентированные вдоль и поперек рельсов; Z — вертикальная, ориентированная вертикально вниз) записывались с разрешением 0,1 с. На рисунке 15 [14] показан 100-секундный фрагмент записи магнитного поля в кабине машиниста электрички в частотном диапазоне (0,05–1 Гц). Видно, что основные колебания магнитного поля выглядят как набор импульсов разной амплитуды и разной длительности.

На рисунке 16 [169] приведена 100-минутная запись вариаций магнитного поля в МВС, измеренных в кабине машиниста (безмоторный вагон) и в моторном вагоне.

Самые большие магнитные поля регистрируются в Y-горизонтальной составляющей, перпендикулярной к рельсам. Типичные флуктуации магнитного поля в кабине машиниста электрички составляли 10–20 мкТл с максимумом в Y-компоненте в 50–60 мкТл. Флуктуации X- и Z-составляющих обычно в несколько раз меньше. В моторных вагонах электрички и в кабине машиниста ЭЛ средний уровень флуктуаций магнитного поля повышается обычно до 80–120 мкТл, максимальные уровни могут быть выше.

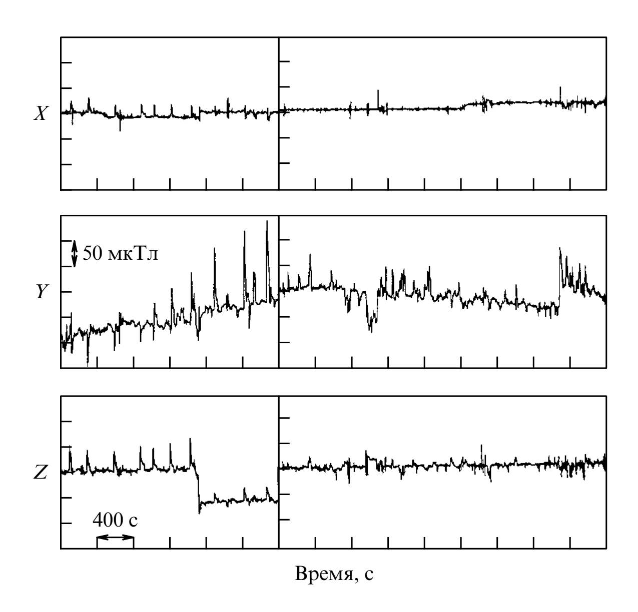


Рис. 16. Фрагмент записи (100 мин) *X*-, *Y*-, *Z*-компонент УНЧ магнитного поля, измеренного на высоте 1 м над полом в вагоне электрички. Слева — внутри моторного вагона, справа — внутри безмоторного вагона [169].

В целом, эти измерения показали, что транспортные магнитные поля совершенно не похожи на преимущественно синусоидальные поля от ЛЭП, они состоят из сложного набора нерегулярных вариаций с резкими изменениями амплитуд и направлений в моменты ускорений или прохождений поездов мимо подстанций. Уровень транспортных магнитных полей в 10 – 100 раз выше, чем уровень магнитных полей от ЛЭП, он сравним, а часто и превышает магнитное поле Земли (35 – 65 мкТл).

6.2. Недельная вариация числа инфарктов миокарда и транспортные магнитные поля

Как следует из предыдущего раздела, магнитные поля от электротяги имеют такой же сложный спектр, как и естественные вариации во время магнитных бурь. Поэтому у людей, подвергающихся воздействию этих полей, например у машинистов поездов и пассажиров, можно ожидать ухудшений деятельности сердечно-сосудистой системы. Рассмотрим эту возможность.

При анализе медико-статистических данных Скорой помощи Москвы и Ленинграда выяснилось [18, 19], что наиболее заметной чертой периодической структуры данных о патологиях нервной и сердечно-сосудистой систем, таких как инфаркты и инсульты, было присутствие 7-дневной вариации с минимумом в конце недели. Наиболее четко эффект наблюдался в данных об инфарктах миокарда в Ленинграде. Число инфарктов в Ленинграде уменьшается в конце недели на 70 %, в Москве — на 20 % (см. рис. 9) и число инсультов в Москве (данных об инсультах в Ленинграде не было) уменьшается на 10 %. Авторы рассмотрели возможные причины такой динамики количества инфарктов и инсультов в течение недели. Отсутствие 7-дневной вариации в данных о других заболеваниях указывает на то, что главная причина этой периодичности с минимумом в субботу и воскресенье не связана с уменьшением населения в городе в эти дни. Более того, среднее число инфарктов и инсультов в праздничные дни, приходящиеся на рабочие дни недели, в пределах статистических ошибок равно их среднему числу в воскресные дни. Это показывает, что 7-дневную периодичность нельзя рассматривать как социальную синхронизацию эндогенного 7-дневного ритма, а она связана с социальной организацией нашей жизни, основанной на чередовании рабочих дней и дней отдыха. По-видимому, маловероятна возможность того, что большой процент людей, страдающих этими заболеваниями, не вызывает врача в субботу и воскресенье, иначе следовало бы ожидать максимального числа вызовов в понедельник, но такого не наблюдается.

Более очевидное объяснение недельной вариации — это низкий уровень рабочего стресса в конце недели. Чтобы проанализировать такую возможность, очень важно сравнить данные Москвы и Ленинграда. Для Ленинграда имеет место удивительно большое снижение числа инфарктов (на 70 %) в конце недели. Предположим, что в Москве уменьшение на 20 % числа инфарктов можно объяснить более низким уровнем рабочего стресса в воскресные и праздничные дни. Отсюда получаем максимальную оценку уменьшения числа инфарктов за счет рабочего стресса, равную ~ 20 %. Таким образом, уменьшение на 70 % числа инфарктов в Ленинграде не может быть объяснено только эффектом рабочего стресса и в любом случае трудно понять, почему в конце недели жители Москвы должны были испытывать более сильный стресс, чем жители Ленинграда.

Авторы [19, 33] предложили рассмотреть техногенные магнитные поля в УНЧ диапазоне как возможную причину недельной вариации числа инфарктов миокарда. На рисунке 17 представлены кривые числа инфарктов и магнитных полей в УНЧ диапазоне в течение недели. Ясно видно, что динамика магнитных полей и число инфарктов в Ленинграде имеют одни и те же характерные черты: они почти постоянны в рабочие дни и сильно уменьшаются в конце недели. Поэтому в [19, 33] был сделан вывод, что уменьшение числа инфарктов в Ленинграде в конце недели и в праздники, вероятно,

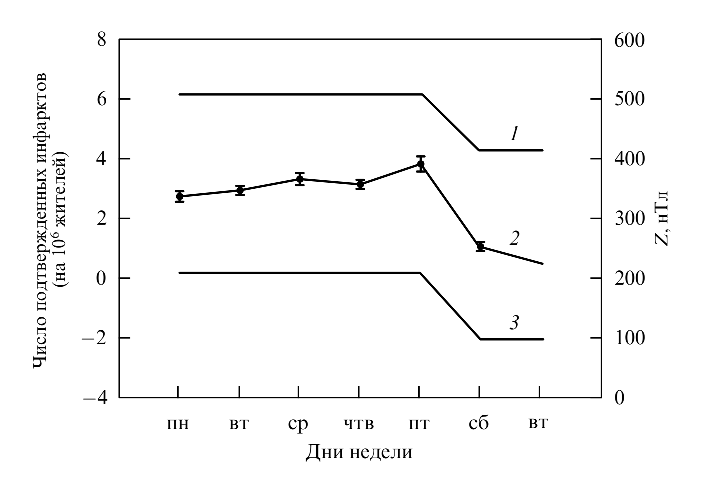


Рис. 17. Средняя недельная вариация амплитуды пиков в *Z*-компоненте магнитного поля, измеренного в Ленинграде: *1*, *3* — на частотах 0,05 – 0,2 и 0,0013 – 0,005 Гц; *2* — средняя недельная вариация числа подтвержденных инфарктов в Ленинграде (1981 г.) [19].

можно связать со снижением в эти дни уровня техногенных магнитных полей, а также со снижением численности населения, подвергающегося воздействию транспортных магнитных полей (меньшее число людей пользуется электротранспортом в субботу и воскресенье). Менее заметное уменьшение числа инфарктов в Москве в воскресные дни может быть частично связано с повышенным по сравнению с Ленинградом магнитным фоном и увеличением в эти дни количества людей, пользующихся электротранспортом ("колбасные электрички", типичные для Москвы 1981 г.).

6.3. Магнитные поля от электротранспорта и сердечно-сосудистые заболевания среди машинистов поездов

Указания на возможную связь между техногенными УНЧ магнитными полями и инфарктами миокарда были получены по данным для Ленинграда [19] (см. раздел 6.2), хотя для того, чтобы определить риск и опасность для здоровья магнитных полей более уверенно, необходимо выделить ту группу людей, которая подвергается повышенному воздействию магнитных полей или, по крайней мере, выделить группы, подвергающиеся воздействию в разной степени. В работах [13, 14, 29, 127] авторы приводят результаты исследования связи между флуктуациями магнитного поля, генерируемыми электрифицированными железными дорогами, и уровнем сердечно-сосудистых заболеваний среди работников железной дороги, в частности, среди машинистов, работающих в поездах разных типов.

Как было показано в разделе 6.1, уровни магнитных полей в ЭЛ и МВС отличаются в 2–4 раза. Поэтому машинистов разного типа поездов можно рассматривать как группы, подвергающиеся, по крайней мере, разной степени воздействия магнитных полей. Авторы провели сравнительный анализ заболеваемости среди машинистов МВС и ЭЛ. Всего было проанализировано 12 000 больничных листов машинистов разных типов поездов и разных возрастов за 1975–1977 гг. В таблице 4 приведены данные о заболеваемости среди машинистов ЭЛ и МВС (электричек). Видно, что для каждой возрастной группы число заболеваний по всем болезням максимально для машинистов МВС, средняя заболеваемость у них в $1{,}35 \pm 0{,}01$ раз выше, чем у машинистов ЭЛ. Это различие получено, в основном, за счет респираторных, желудочно-кишечных и кожных заболеваний, травм и несчастных случаев. Для сердечно-сосудистых заболеваний ситуация другая. По данным о гипертонии не обнаружено никаких закономерностей для разных возрастных групп и нет значительных различий в среднем числе заболеваний в пределах статистической значимости. В данных об ишемической болезни сердца (ИБС), напротив, наблюдается четкая закономерность: самое большое число случаев заболеваний в каждой возрастной группе наблюдается у машинистов ЭЛ и наименьшее — у машинистов МВС. Профессиональный риск заболевания ИБС между этими двумя группами машинистов отличается в $2{,}00 \pm 0{,}27$ раз. Кроме того, у машинистов электричек ИБС наблюдается только после 40-летнего возраста, в то время как у машинистов ЭЛ ишемия отмечается уже в возрасте до 30 лет.

Авторы [13, 14, 29, 127] исследовали возможную роль разных факторов риска развития этих заболеваний и нашли, что эти две группы машинистов, по всей вероятности, подвергаются одинаковому рабочему стрессу и имеют одинаковые "классические" факторы риска для сердечно-сосудистых заболеваний, связанные с питанием, курением, рабочим стрессом и т.д. Наиболее заметное различие в условиях труда заключается в разной степени воздействия магнитным полем, а именно, в кабинах машинистов ЭЛ наблюдается гораздо более высокий уровень магнитных полей. Следовательно, повышенный риск развития ИБС у машинистов ЭЛ действительно может быть связан с повышенным уровнем магнитных полей УНЧ диапазона на их рабочих местах. Отсутствие значительных различий в заболеваемости гипертонией для этих групп машинистов может указывать на то, что развитие гипертонии не связано с влиянием магнитного поля. Это согласуется с результатами статистического анализа данных о влиянии естественных вариаций геомагнитного поля (больших геомагнитных бурь) на разного рода заболевания [18]: наблюдаются заметные эффекты в данных об инфарктах миокарда и инсультах, но не обнаруживается никаких эффектов в данных о гипертонии (см. раздел 3.1). Этот вывод согласуется также с результатами биологических исследований, в которых не обнаружено изменений давления крови у людей, подвергавшихся воздействию магнитных полей [132, 138]. Различие в распространенности ИБС у машинистов поездов разного типа, установлено по медико-статистическим данным [13, 14, 29, 127], собранным вслепую, без всякой связи с магнитными полями. Эти медицинские данные были собраны 15 лет назад. В то время полученные закономерности было трудно понять, так как в общем машинисты ЭЛ, как считалось, имеют более здоровые условия труда, чем машинисты МВС. Следовательно, было легко объяснить более низкий уровень заболеваемости по всем болезням у машинистов ЭЛ лучшими условиями труда. Однако эта точка зрения противоречила результатам по заболеваемости ИБС, т.е. повышенному в 2 раза риску развития ИБС у машинистов ЭЛ по сравнению с машинистами

Таблица 4

Заболевания	Тип тяги	Возрастные группы				По всем возрастным группам
		20–29 лет	30–39 лет	40–49 лет	50–59 лет	
Болезни системы	ЭЛ	15,8	29,5	67,0	149,7	58,9 + 2,2
кровообращения (390–458)	МВС	—	48,4	36,3	161,3	57,6 + 2,2
Ишемическая болезнь	ЭЛ	1,6	2,7	13,9	40,8	12,4 + 1,0
сердца (410–414)	МВС	—	—	5,2	21,5	6,2 + 0,7
Гипертоническая болезнь	ЭЛ	9,5	12,0	36,5	86,2	32,0 + 1,6
(400–404)	МВС	—	—	25,9	129,0	35,0 + 1,7
По всем классам болезней	ЭЛ	987	1519	1298	1513	1315 + 10
(000–999)	МВС	1000	2484	1554	1915	1774 + 12

МВС. Объяснение этому факту, данное в [13, 14, 29, 127], предполагает, что магнитные поля от электротяги могут играть важную роль в возникновении и/или развитии ишемической болезни сердца.

7. Физическое взаимодействие магнитных полей с живыми системами

7.1. Механизмы взаимодействия

Магнитные поля могут свободно проникать в тело человека, так как ткани тела почти не уменьшают их интенсивность. Действительно, амплитуда гармоник поля на частоте ω в контуре на глубине h внутри тела будет уменьшаться в f_s раз:

$$f_s(\omega, h, \sigma, \mu) = \exp\left(-\frac{h}{\delta}\right), \qquad (1)$$

где пробег до поглощения δ зависит согласно [170] от проницаемости μ (≈ 1) и проводимости σ: $\delta = c(2\pi\mu\omega\sigma)^{-1/2}$. Для $\omega < 10^6$ с$^{-1}$ имеем $\delta > 10^3$ см, тогда для $h \leqslant 10$ см $f_s \approx 1$.

Теоретически возможны два типа эффектов от воздействия магнитных полей: магнитомеханический и электромагнитный [171]. Магнитомеханические эффекты могут привести к изменениям ориентации и/или к смещению частиц, обладающих магнитными свойствами. В последние годы кластеры или цепи магнетитовых кристаллов ("магнитосомы") были обнаружены в некоторых живых системах [172], в том числе, в мозгу человека [173, 174]. Получена совокупность научных доказательств, указывающая на то, что эти магнитные элементы у мигрирующих птиц, рыб и насекомых способны чувствовать геомагнитное поле и использовать информацию о нем для ориентации и навигации.

Полагают, что вращающий момент, создаваемый магнитным полем в однодоменных кристаллах или упругие эффекты взаимодействия между супермагнитными кристаллами меньшего размера каким-то образом преобразовываются в нервные импульсы, которые передают соответствующую информацию к специальным центрам мозга, где эта информация обрабатывается [174–176].

На основе того факта, что проводящая жидкость, движущаяся в магнитном поле, создает электрические токи, было предложено несколько вариантов магнитогидродинамических механизмов, приводящих к изменениям в сердечно-сосудистой циркуляторной системе [177, 178]. Взаимодействие магнитного поля с электрическим током порождает силы, которые замедляют или ускоряют движение проводящей жидкости в зависимости от того, выше или ниже скорость движущегося магнитного поля, чем скорость жидкости. Например, для случая тока крови в статических магнитных полях движение будет тормозиться. Чтобы получить измеримый эффект, нужно иметь поле порядка 1 – 10 Тл.

Другой тип эффекта от воздействия магнитных полей можно получить на основе закона индукции Фарадея, согласно которому меняющееся во времени магнитное поле генерирует электрическое поле в замкнутом контуре.

Магнитное поле $\mathbf{B}$ состоит из естественного геомагнитного поля $\mathbf{B}_{\rm n}$ и техногенного $\mathbf{B}_{\rm m}$ и его можно разделить на две части, на постоянное поле $\mathbf{B}_{\rm c} = \mathbf{B}_{\rm nc} + \mathbf{B}_{\rm mc}$ и переменное $\mathbf{B}_{\rm v} = \mathbf{B}_{\rm nv} + \mathbf{B}_{\rm mv}$:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_{\rm c} + \mathbf{B}_{\rm v} = \mathbf{B}_{\rm n} + \mathbf{B}_{\rm m} = \mathbf{B}_{\rm nc} + \mathbf{B}_{\rm nv} + \mathbf{B}_{\rm mc} + \mathbf{B}_{\rm mv}\,. \qquad (2)$$

Магнитный поток Φ через замкнутый контур длиной L и поверхностью $\mathbf{S} = S\mathbf{n}$, где $\mathbf{n}$ — единичный вектор, нормальный к поверхности, равен

$$\Phi = \mathbf{B} \times \mathbf{S} = BS\cos\alpha\,. \qquad (3)$$

Здесь α — угол между $\mathbf{B}$ и $\mathbf{S}$. Индуцированная электродвижущая сила Ψ в замкнутом контуре согласно закону Фарадея будет равна в системе МКСА:

$$\Psi = \int_L \mathbf{E}\,\mathrm{d}\mathbf{l} = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -S\cos\alpha\,\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} - B\cos\alpha\,\frac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}t} - BS\,\frac{\mathrm{d}\cos\alpha}{\mathrm{d}t}\,. \qquad (4)$$

Из уравнения (4) видно, что есть три механизма генерации Ψ в замкнутых контурах внутри тела:

а) изменения во времени интенсивности магнитного поля внутри тела,

б) изменения во времени сечения контура в присутствии поля,

в) изменения во времени угла α между направлением поля и нормалью к поверхности замкнутого контура.

Рассмотрим подробно все возможные случаи генерации электродвижущих сил.

7.2. Электродвижущая сила Ψ, генерируемая изменениями во времени интенсивности магнитного поля внутри тела

Рассмотрим более детально первый член в правой части уравнения (4):

$$\Psi_1 = -S\cos\alpha\,\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} = -S\cos\alpha\left(\frac{\partial B}{\partial t} + \frac{\partial B}{\partial \mathbf{r}}\,\mathbf{V}\right) = -S\cos\alpha_{\rm v}\,\frac{\partial B_{\rm v}}{\partial t} - S\cos\alpha_{\rm c}\,\frac{\partial B_{\rm c}}{\partial \mathbf{r}}\,\mathbf{V} - S\cos\alpha_{\rm v}\,\frac{\partial B_{\rm v}}{\partial \mathbf{r}}\,\mathbf{V}\,, \qquad (5)$$

где V — скорость замкнутого контура (в большинстве случаев она совпадает со скоростью тела) относительно системы координат, в которой рассматривается магнитное поле. Первый член в правой части (5) отражает влияние переменной составляющей поля:

$$\Psi_{11} = -S\cos\alpha\,\frac{\partial B_{\rm v}}{\partial t} = -S\cos\alpha_{\rm n}\,\frac{\partial B_{\rm nv}}{\partial t} - S\cos\alpha_{\rm m}\,\frac{\partial B_{\rm mv}}{\partial t} = S\sum_{i=1}^{l}\omega_{{\rm n}i}B_{{\rm n}i}\sin(\omega_{{\rm n}i}t - \varphi_{{\rm n}i})\cos\alpha_{{\rm n}i} + S\sum_{k=1}^{p}\omega_{{\rm m}k}B_{{\rm m}k}\sin(\omega_{{\rm m}k}t - \varphi_{{\rm m}k})\cos\alpha_{{\rm m}k}\,, \qquad (6)$$

где

$$B_{\rm nv} = \sum_{i=1}^{l} B_{{\rm n}i}\cos(\omega_{{\rm n}i}t - \varphi_{{\rm n}i})\,,$$

$$B_{\rm mv} = \sum_{k=1}^{p} B_{{\rm m}i}\cos(\omega_{{\rm m}i}t - \varphi_{{\rm m}i})\,, \qquad (7)$$

а угол α может быть разным для разных гармоник: α_{ni} — для естественного геомагнитного поля и α_{mk} — для техногенного поля.

Рассмотрим второй член (5), т.е. случай, когда ψ генерируется движением контура в квазипостоянном магнитном поле, которое имеет пространственный градиент:

$$\Psi_{12} = -S\cos\alpha\,\frac{\partial B_c}{\partial \mathbf{r}}\,\mathbf{V} = -S\cos\alpha_n\,\frac{\partial B_{nc}}{\partial \mathbf{r}}\,\mathbf{V} - S\cos\alpha_m\,\frac{\partial B_{mc}}{\partial \mathbf{r}}\,\mathbf{V}\,. \tag{8}$$

В этом случае вклад геомагнитного поля B_{nc}, даже в случае движения тела с большой скоростью (например, 8×10^3 м с$^{-1}$ на спутнике), очень мал из-за малости величины $\partial B_{nc}/\partial\mathbf{r}$, в то время как вклад от техногенных магнитных полей в (8) может быть гораздо более значительным. Характерная частота для Ψ будет $\nu_{mc}\approx V/r_{mc}$, где r_{mc} — это характерное расстояние, на котором техногенное магнитное поле меняется в е раз. Например, если человек бежит со скоростью $V\approx 4$ м с$^{-1}$ и $r_{mc}\approx 2$ м, тогда $\nu_{mc}=2$ Гц, что близко к собственным частотам человеческого тела. Это случай, когда может быть реализовано резонансное взаимодействие. Предположим, что

$$\frac{\partial B_c}{\partial \mathbf{r}}\,\mathbf{V} \approx \frac{\partial B_{mc}}{\partial \mathbf{r}}\,\mathbf{V} = \sum_{r=1}^{x} b_{cr}\cos(\omega_{cr}t-\varphi_{cr})\,, \tag{9}$$

и подставим эту величину в (8). Таким образом, получим выражение, учитывающее влияние квазипостоянной части магнитного поля:

$$\Psi_{12} = -S\sum_{r=1}^{x} b_{cr}\cos\alpha_{cr}\cos(\omega_{cr}t-\varphi_{cr})\,, \tag{10}$$

в котором учтено, что углы α_{cr} могут быть разными для разных гармоник ω_{cr}.

Теперь рассмотрим последний член в (5):

$$\Psi_{13} = -S\cos\alpha\,\frac{\partial B_v}{\partial \mathbf{r}}\,\mathbf{V} = -S\cos\alpha_n\,\frac{\partial B_{nv}}{\partial \mathbf{r}}\,\mathbf{V} - S\cos\alpha_m\,\frac{\partial B_{mv}}{\partial \mathbf{r}}\,\mathbf{V}\,. \tag{11}$$

Это выражение определяется движением замкнутого контура в магнитном поле при наличии пространственного градиента его переменной части. В этом случае вклад от естественного геомагнитного поля также пренебрежимо мал, тогда наиболее существенным является эффект, обусловленный влиянием на движущееся тело градиента переменной части техногенного поля. Полагая, что, аналогично тому, как в (7)

$$B_v \approx B_{mv} = \sum_{k=1}^{p} B_{mk}\cos(\omega_{mk}t-\varphi_{mk})$$

и что, как в (9),

$$\frac{\partial B_{mk}}{\partial \mathbf{r}}\,\mathbf{V} = \sum_{j=1}^{q} b_{mkj}\cos(\omega_{mkj}t-\varphi_{mkj})\,, \tag{12}$$

получаем:

$$\Psi_{13v} = -S\sum_{k=1}^{p}\sum_{j=1}^{q} b_{mkj}\cos\alpha_{kj}\cos(\omega_{mk}t-\varphi_{mk})\times \cos(\omega_{mkj}t-\varphi_{mkj}) = -S\sum_{k=1}^{p}\sum_{j=1}^{q} b_{mkj}\cos\alpha_{kj}\Big\{\cos\big[(\omega_{mk}+\omega_{mkj})t - (\varphi_{mk}+\varphi_{mkj})\big] + \cos\big[(\omega_{mk}-\omega_{mkj})t-(\varphi_{mk}-\varphi_{mkj})\big]\Big\}\,. \tag{13}$$

Уравнение (13) показывает, что в этом случае наблюдается интерференция гармоник, входящих в состав B_{mv} согласно выражению (7), и гармоник, возникающих за счет движения тела в соответствии с (12). В результате этой интерференции индуцированная электродвижущая сила Ψ в замкнутом контуре состоит из гармоник на частотах $\omega_{mk}\pm\omega_{mkj}$ с амплитудами $Sb_{mkj}\cos\alpha_{kj}$.

7.3. Индуцированная электродвижущая сила Ψ, вызванная изменениями в сечении замкнутого контура в магнитных полях естественного и техногенного происхождения

Рассмотрим второй член в (4):

$$\Psi_2 = -B\cos\alpha\,\frac{dS}{dt} = -B\cos\alpha\,\frac{\partial S}{\partial t} - B\cos\alpha\,\frac{\partial S}{\partial \mathbf{r}}\,\mathbf{V}\,. \tag{14}$$

Первая часть выражения отражает Ψ, генерированную за счет вариаций во времени эффективного сечения замкнутого контура (например, в результате ритмических изменений при дыхании, при сердцебиении и т.п.) в естественных и техногенных магнитных полях. Вторая часть отражает ситуацию, когда изменения в S вызываются изменениями положения замкнутого контура со скоростью V (т.е.случай движущегося тела).

В первой части (14), обусловленной изменениями со временем S:

$$\Psi_{21} = -|\mathbf{B}_{nc}+\mathbf{B}_{mc}|\cos\alpha\,\frac{\partial S}{\partial t} - |\mathbf{B}_{nv}+\mathbf{B}_{mv}|\cos\alpha\,\frac{\partial S}{\partial t}\,, \tag{15}$$

присутствует вклад от постоянной части магнитного поля как естественного, так и техногенного происхождения и Ψ пропорциональна суммарной интенсивности естественных и техногенных магнитных полей. Предполагая, что изменения во времени S можно описать формулой

$$S(t) = \sum_{j=1}^{q} S_j\cos(\omega_{sj}t-\varphi_{sj})\,, \tag{16}$$

находим вклад в Ψ_{21} от постоянного поля:

$$\Psi_{21c} = |\mathbf{B}_{nc}+\mathbf{B}_{mc}|\cos\alpha\sum_{j=1}^{q}\omega_{sj}S_j\sin(\omega_{sj}t-\varphi_{sj})\,. \tag{17}$$

Квазипостоянная часть техногенного магнитного поля в некоторых местах, например в общественном электротранспорте, может быть гораздо больше, чем естественное поле, и может генерировать гораздо более сильную электродвижущую силу Ψ в ритмически изменяющихся замкнутых контурах в соответствии с (17). Предполо-

жим, что в эффекте за счет временных изменений S в переменном магнитном поле само переменное поле можно представить так же, как в (7), а изменения S — формулой (16). В этом случае

$$\Psi_{21\mathrm{v}} = \sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{q} B_{\mathrm{n}i}\omega_{sj}S_j\cos\alpha_{ij}\cos(\omega_{\mathrm{n}i}t-\varphi_{\mathrm{n}i})\sin(\omega_{sj}t-\varphi_{sj})+$$
$$+\sum_{k=1}^{p}\sum_{j=1}^{q} B_{\mathrm{m}k}\omega_{sj}S_j\cos\alpha_{kj}\cos(\omega_{\mathrm{m}k}t-\varphi_{\mathrm{m}k})\sin(\omega_{sj}t-\varphi_{sj})=$$
$$=\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{q} B_{\mathrm{n}i}\omega_{sj}S_j\cos\alpha_{ij}\Big\{\sin\big[(\omega_{\mathrm{n}i}+\omega_{sj})t-(\varphi_{\mathrm{n}i}+\varphi_{sj})\big]+$$
$$+\sin\big[(\omega_{sj}-\omega_{\mathrm{n}i})t-(\varphi_{sj}-\varphi_{\mathrm{n}i})\big]\Big\}+$$
$$+\sum_{k=1}^{p}\sum_{j=1}^{q} B_{\mathrm{m}k}\omega_{sj}S_j\cos\alpha_{kj}\Big\{\sin\big[(\omega_{\mathrm{m}k}+\omega_{sj})t-(\varphi_{\mathrm{m}k}+\varphi_{sj})\big]+$$
$$+\sin\big[(\omega_{sj}-\omega_{\mathrm{m}k})t-(\varphi_{sj}-\varphi_{\mathrm{m}k})\big]\Big\}\,. \qquad (18)$$

Уравнение (18) выражает нелинейную интерференцию разных гармоник как переменного естественного, так и переменного техногенного магнитных полей, с гармониками, описывающими изменения во времени самих контуров. Эта интерференция будет порождать новые гармоники с частотами $\omega_{\mathrm{n}i}\pm\omega_{sj}$ и $\omega_{\mathrm{m}k}\pm\omega_{sj}$ с амплитудами $B_{\mathrm{n}i}\omega_{sj}S_j\cos\alpha_{ij}$ и $B_{\mathrm{m}k}\omega_{sj}S_j\cos\alpha_{kj}$.

Теперь рассмотрим второй член правой части (14), который отражает ситуацию, когда изменения S вызываются изменениями положения замкнутого контура в пространстве со скоростью $\mathbf{V}=\mathrm{d}\mathbf{r}/\mathrm{d}t$. Эти изменения S могут иметь ритмический характер, например во время ходьбы, бега или физических упражнений:

$$\Psi_{22} = -|\mathbf{B}_{\mathrm{nc}}+\mathbf{B}_{\mathrm{mc}}|\cos\alpha\,\frac{\partial S}{\partial\mathbf{r}}\,\mathbf{V} - |\mathbf{B}_{\mathrm{nv}}+\mathbf{B}_{\mathrm{mv}}|\cos\alpha\,\frac{\partial S}{\partial\mathbf{r}}\,\mathbf{V}. \quad (19)$$

Если $(\partial S/\partial\mathbf{r})\mathbf{V}$ в присутствии квазипостоянной части естественного B_{nc} и техногенного B_{mc} магнитного полей можно представить в виде

$$\frac{\partial S}{\partial\mathbf{r}}\,\mathbf{V} = \sum_{j=1}^{x} s_j\cos(\omega_{\mathrm{v}j}\,t-\varphi_{\mathrm{v}j})\,, \qquad (20)$$

то вклад от B_{c} в Ψ_{22} можно записать следующим образом:

$$\Psi_{22\mathrm{c}} = -B_{\mathrm{nc}}\cos\alpha_{\mathrm{nc}}\sum_{j=1}^{x} s_j\cos(\omega_{\mathrm{v}j}\,t-\varphi_{\mathrm{v}j}) -$$
$$- B_{\mathrm{mc}}\cos\alpha_{\mathrm{mc}}\sum_{j=1}^{x} s_j\cos(\omega_{\mathrm{v}j}\,t-\varphi_{\mathrm{v}j})\,. \qquad (21)$$

Здесь мы считали, что углы α_{nc}, α_{mc} между нормалью к замкнутому контуру и направлением магнитного поля могут быть разными для естественного и техногенного полей. В (21) первый член в правой части описывает главным образом естественную ситуацию, к которой человек должен был адаптироваться в течение длительной эволюции. Второй член описывает влияние квазипостоянной составляющей техногенных магнитных полей. Он может быть более биологически значимым, особенно в городской среде, в технологических зонах и в общественном транспорте.

Теперь рассмотрим второй член в правой части (19), т.е. влияние переменной части магнитного поля на изменения S, вызванные движением контура. При этом, принимая во внимание (20) и (7), для переменной части получаем:

$$\Psi_{22\mathrm{v}} = -\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{q} B_{\mathrm{n}i}s_j\cos\alpha_{\mathrm{n}i}\cos(\omega_{\mathrm{n}i}\,t-\varphi_{\mathrm{n}i})\cos(\omega_{\mathrm{v}j}t-\varphi_{\mathrm{v}j})-$$
$$-\sum_{k=1}^{p}\sum_{j=1}^{q} B_{\mathrm{m}k}s_j\cos\alpha_{\mathrm{m}k}\cos(\omega_{\mathrm{m}k}t-\varphi_{\mathrm{m}k})\cos(\omega_{\mathrm{v}j}t-\varphi_{\mathrm{v}j}) =$$
$$=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{q} B_{\mathrm{n}i}s_j\cos\alpha_{\mathrm{n}i}\Big\{\cos\big[(\omega_{\mathrm{n}i}+\omega_{\mathrm{v}j})t-(\varphi_{\mathrm{n}i}+\varphi_{\mathrm{v}j})\big]+$$
$$+\cos\big[(\omega_{\mathrm{v}j}-\omega_{\mathrm{n}i})t-(\varphi_{\mathrm{v}j}-\varphi_{\mathrm{n}i})\big]\Big\}+$$
$$+\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{l}\sum_{j=1}^{q} B_{\mathrm{m}k}s_j\cos\alpha_{\mathrm{m}k}\Big\{\cos\big[(\omega_{\mathrm{m}k}+\omega_{\mathrm{v}j})t-(\varphi_{\mathrm{m}k}+\varphi_{\mathrm{v}j})\big]+$$
$$+\cos\big[(\omega_{\mathrm{v}j}-\omega_{\mathrm{m}k})t-(\varphi_{\mathrm{v}j}-\varphi_{\mathrm{m}k})\big]\Big\}\,, \qquad (22)$$

где два члена отражают влияние соответственно переменного естественного (n) и переменного техногенного (m) магнитного поля. Уравнение (22) показывает, что вместо гармоник с частотами $\omega_{\mathrm{n}i}$, $\omega_{\mathrm{v}j}$ и $\omega_{\mathrm{m}k}$, $\omega_{\mathrm{v}j}$ после взаимодействия переменного магнитного поля с ритмически движущимся контуром получаем Ψ в движущихся замкнутых контурах, характеризующуюся гармониками с частотами $\omega_{\mathrm{n}i}\pm\omega_{\mathrm{v}j}$ и амплитудами $(1/2)B_{\mathrm{n}i}s_j\cos\alpha_{\mathrm{n}i}$ для естественных магнитных полей и $\omega_{\mathrm{m}k}\pm\omega_{\mathrm{v}j}$ и $(1/2)B_{\mathrm{m}k}s_j\cos\alpha_{\mathrm{m}k}$ для техногенных полей.

7.4. Индуцированная Ψ в замкнутом контуре, вызванная изменениями угла между нормалью к контуру и направлением магнитного поля

Рассмотрим третий член в (4), который описывает индуцированную электродвижущую силу Ψ в замкнутых контурах, вызванную изменениями угла α между нормалью к контуру и направлением магнитного поля:

$$\Psi_3 = -BS\,\frac{\mathrm{d}\cos\alpha}{\mathrm{d}t} = -BS\,\frac{\partial\cos\alpha}{\partial t} - BS\,\frac{\partial\cos\alpha}{\partial\mathbf{r}}\,\mathbf{V}\,. \qquad (23)$$

Первый член правой части описывает образование индуцированной Ψ в замкнутых контурах за счет изменений угла α во времени, второй член в уравнении, описывающем Ψ, связан с движением тела, сопровождающимся изменениями α. Рассмотрим первый член правой части (23):

$$\Psi_{31} = -BS\,\frac{\partial\cos\alpha}{\partial t} =$$
$$= S|\mathbf{B}_{\mathrm{nc}}+\mathbf{B}_{\mathrm{mc}}|\sin\alpha\,\frac{\partial\alpha}{\partial t} + S|\mathbf{B}_{\mathrm{nv}}+\mathbf{B}_{\mathrm{mv}}|\sin\alpha\,\frac{\partial\alpha}{\partial t}\,. \quad (24)$$

Предположим, что тело вращается относительно короткий период времени и это вращение можно характеризовать частотой ω_{r} и фазой φ_{r}: $\alpha=\omega_{\mathrm{r}}t-\varphi_{\mathrm{r}}$. В этом случае первый член в правой части (24) будет иметь вид:

$$\Psi_{31\mathrm{c}} = S|\mathbf{B}_{\mathrm{nc}}+\mathbf{B}_{\mathrm{mc}}|\omega_{\mathrm{r}}\sin(\omega_{\mathrm{r}}t-\varphi_{\mathrm{r}})\,. \qquad (25)$$

Для той части выражения (24), которая описывает роль переменных магнитных полей естественного и техногенного происхождения, если предположить снова, что тело вращается в течение некоторого короткого времени с частотой $\omega_{\rm r}$ и фазой $\varphi_{\rm r}$, получим для переменных магнитных полей, описываемых формулой (7), следующее уравнение:

$$\Psi_{31{\rm v}} = S\sum_{i=1}^{l} \omega_{\rm r} B_{{\rm n}i} \cos(\omega_{{\rm n}i} t - \varphi_{{\rm n}i}) \sin(\omega_{\rm r} t - \varphi_{\rm nr}) + S\sum_{k=1}^{p} \omega_{\rm r} B_{{\rm m}k} \cos(\omega_{{\rm m}k} t - \varphi_{{\rm m}k}) \sin(\omega_{\rm r} t - \varphi_{\rm mr})\,. \quad (26)$$

Его можно переписать в виде

$$\Psi_{31{\rm v}} = S\omega_{\rm r}\frac{1}{2}\left\{\sum_{i=1}^{1} B_{{\rm n}i}\Big[\sin\big((\omega_{\rm r}+\omega_{{\rm n}i})t-(\varphi_{{\rm n}r}+\varphi_{{\rm n}i})\big) + \sin\big((\omega_{\rm r}-\omega_{{\rm n}i})t-(\varphi_{\rm nr}-\varphi_{{\rm n}i})\big)\Big] + \sum_{k=1}^{p} B_{{\rm m}k}\Big[\sin\big((\omega_{\rm r}+\omega_{{\rm m}k})t-(\varphi_{\rm mr}+\varphi_{{\rm m}k})\big) + \sin\big((\omega_{\rm r}-\omega_{{\rm m}k})t-(\varphi_{\rm mr}-\varphi_{{\rm m}k})\big)\Big]\right\}. \quad (27)$$

В этом случае гармоники индуцированной Ψ также будут генерироваться с амплитудами $(1/2)S\omega_{\rm r}B_{{\rm n}i}$ и частотами $\omega_{\rm r} \pm \omega_{{\rm n}i}$ для естественного переменного магнитного поля и с амплитудами $(1/2)S\omega_{\rm r}B_{{\rm m}k}$ и частотами $\omega_{\rm r} \pm \omega_{{\rm m}k}$ для техногенного переменного магнитного поля.

Теперь рассмотрим второй член в правой части (23), который описывает индуцированную Ψ в замкнутых контурах, вызванную движением тела со скоростью $\mathbf{V} = {\rm d}\mathbf{r}/{\rm d}t$ и изменениями угла α:

$$\Psi_{32} = -S|\mathbf{B}_{\rm nc} + \mathbf{B}_{\rm nv}|\frac{\partial\cos\alpha}{\partial\mathbf{r}}\,\mathbf{V} - S|\mathbf{B}_{\rm mc} + \mathbf{B}_{\rm mv}|\frac{\partial\cos\alpha}{\partial\mathbf{r}}\,\mathbf{V}\,. \quad (28)$$

Первый член описывает влияние постоянного и переменного магнитного полей естественного происхождения, градиент которых на поверхности Земли мал. Как можно ожидать, этот член пренебрежимо мал ($\Psi_{32{\rm n}} \approx 0$) даже для больших скоростей движения тела (например, для самолета или на спутнике). Второй член показывает роль постоянного и переменного техногенных магнитных полей, которые часто характеризуются гораздо большими градиентами. В этом случае, если можно записать

$$\frac{\partial\cos\alpha}{\partial\mathbf{r}}\,\mathbf{V} = \sum_{j=1}^{x} A_{{\rm mc}j}\cos(\omega_{{\rm mc}j}t - \varphi_{{\rm mc}j}) + \sum_{j=1}^{y} A_{{\rm mv}j}\cos(\omega_{{\rm mv}j}t - \varphi_{{\rm mv}j})\,, \quad (29)$$

то получим

$$\Psi_{32{\rm mc}} = -SB_{\rm mc}\sum_{j=1}^{x} A_{{\rm mc}j}\cos(\omega_{{\rm mc}j}t - \varphi_{{\rm mc}j})\,, \quad (30)$$

$$\Psi_{32{\rm mv}} = -S\sum_{k=1}^{p} B_{\rm mk}\cos(\omega_{\rm mk}t - \varphi_{\rm mk}) \times \sum_{j=1}^{y} A_{{\rm mv}j}\cos(\omega_{{\rm mv}j}t - \varphi_{{\rm mv}j}) = \frac{1}{2}S\sum_{k=1}^{p}\sum_{j=1}^{y} B_{\rm mk}A_{{\rm mv}j}\Big\{\cos\big[(\omega_{\rm mk}-\omega_{{\rm mv}j})t-(\varphi_{\rm mk}-\varphi_{{\rm mv}j})\big] + \cos\big[(\omega_{\rm mk}+\omega_{{\rm mv}j})t-(\varphi_{\rm mk}+\varphi_{{\rm mv}j})\big]\Big\}\,, \quad (31)$$

где для переменной части техногенных полей учтено выражение (7). Уравнение (30) показывает, что для тела, движущегося в магнитных полях с большими градиентами, ожидаемые гармоники Ψ от почти постоянных техногенных магнитных полей будут иметь амплитуды $SB_{\rm mc}A_{{\rm mc}j}$ на частотах $\omega_{{\rm mc}j}$, а от переменных техногенных полей согласно (31) ожидаемые гармоники будут иметь амплитуды $SB_{{\rm m}k}A_{{\rm mv}j}$ на частотах $|\omega_{{\rm mv}j} \pm \omega_{{\rm m}k}|$.

7.5. Резонансное взаимодействие собственных электродвижущих сил Ψ в замкнутых контурах с Ψ, индуцированными магнитными полями естественного и техногенного происхождения

Предположим, что в замкнутом контуре S имеются собственные электродвижущие силы, которые можно выразить как

$$\Psi_s = \Psi_{s0}\sin(\omega_s t - \varphi_s)\,. \quad (32)$$

Выражение (32) есть решение уравнения:

$$\ddot{\Psi} = -\omega_s^2\Psi_s \quad (33)$$

с начальными условиями

$$\Psi_s(t=0) = -\Psi_{s0}\sin(\varphi_s)\,, \qquad \dot{\Psi}_s = \Psi_{s0}\cos(\varphi_s)\,.$$

Уравнение (33) — это аналог уравнения собственных механических колебаний $F = -aX$ или $F = m\ddot{X}$, так что

$$\ddot{X} = -\omega_s^2 X\,, \quad (34)$$

где $\omega_s^2 = am$. Вспомним, что, если на механический колебательный процесс действуют внешние силы

$$F_{\rm e} = -A_{\rm e}\omega_{\rm e}^2\sin(\omega_{\rm e}t - \varphi_{\rm e})\,,$$

то уравнение (34) принимает вид

$$\ddot{X} = -\omega_s^2 X - A_{\rm e}\omega_{\rm e}^2\sin(\omega_{\rm e}t - \varphi_{\rm e})\,, \quad (35)$$

решением которого для вынужденных колебаний является

$$X = \frac{A_{\rm e}\omega_{\rm e}^2\sin(\omega_{\rm e}t - \varphi_{\rm e})}{|\omega_{\rm e}^2 - \omega_s^2|}\,. \quad (36)$$

Если учесть, что каждая собственная частота будет иметь некоторую полуширину Γ_s, то решение (36) примет вид

$$X = \frac{A_{\rm e}\omega_{\rm e}^2\sin(\omega_{\rm e}t - \varphi_{\rm e})}{|\omega_{\rm e}^2 - \omega_s^2| + \Gamma_s^2}\,. \quad (37)$$

Резонансное взаимодействие будет иметь место для всех случаев, приведенных в предыдущих разделах.

Например, рассмотрим резонансное взаимодействие собственной электродвижущей силы в замкнутом контуре с Ψ, индуцированной переменной частью естественных и техногенных магнитных полей (см. раздел 7.2). Для этого необходимо добавить в правую часть уравнения (33) дополнительные члены, аналогичные (35), найденные на основе уравнения (6):

$$\frac{\mathrm{d}^2\Psi_{11}}{\mathrm{d}t^2} = -\omega_s^2\Psi_{11} - S\sum_{i=1}^{l}\omega_{\mathrm{n}i}^3 B_{\mathrm{n}i}\sin(\omega_{\mathrm{n}i}t - \varphi_{\mathrm{n}i})\cos\alpha_{\mathrm{n}i} - \\ - S\sum_{k=1}^{p}\omega_{\mathrm{m}k}^3 B_{\mathrm{m}k}\sin(\omega_{\mathrm{m}k}t - \varphi_{\mathrm{m}k})\cos\alpha_{\mathrm{m}k}\,. \qquad (38)$$

Решение уравнения (38) с учетом (37) можно записать так:

$$\Psi_{11} = S\sum_{i=1}^{l}\omega_{\mathrm{n}i}^3\,\frac{B_{\mathrm{n}i}\sin(\omega_{ni}t - \varphi_{\mathrm{n}i})\cos\alpha_{\mathrm{n}i}}{|\omega_{\mathrm{n}i}^2 - \omega_s^2| + \Gamma_s^2} + \\ + S\sum_{k=1}^{p}\omega_{\mathrm{m}k}^3\,\frac{B_{\mathrm{m}k}\sin(\omega_{\mathrm{m}k}t - \varphi_{\mathrm{m}k})\cos\alpha_{\mathrm{m}k}}{|\omega_{\mathrm{m}k}^2 - \omega_s^2| + \Gamma_s^2}\,. \qquad (39)$$

Решение (39) отличается от (6) только в частотной области вблизи собственной частоты ω_s, где исходный спектр индуцированной Ψ возрастает из-за резонансного эффекта примерно в ω_s^2/Γ_s^2 раз. Если $\Gamma_s \approx 0{,}1\omega_s$, то увеличение будет в ≈ 100 раз, т.е. индуцированная Ψ на этой частоте будет увеличена в 100 раз за счет резонансного эффекта. Если замкнутые контуры имеют несколько собственных частот $\omega_{s1}, \omega_{s2}, \ldots, \omega_{sn}$ с полушириной $\Gamma_{s1}, \Gamma_{s2}, \ldots, \Gamma_{sn}$, то будет несколько резонансных увеличений электродвижущих сил Ψ в $\omega_{s1}^2/\Gamma_{s1}^2, \omega_{s2}^2/\Gamma_{s2}^2, \ldots$ $\ldots, \omega_{sn}^2/\Gamma_{sn}^2$ раз, вызванных переменными частями естественных и техногенных магнитных полей, соответственно, на собственных частотах $\omega_{s1}, \omega_{s2}, \ldots, \omega_{sn}$.

8. Нерешенные проблемы

8.1. Биофизическое взаимодействие между слабыми магнитными полями и живыми системами

До сих пор нет общепринятого теоретического объяснения биологического действия слабых магнитных полей, обычно окружающих человека дома и на работе. Эта область исследований имеет значительный разрыв между экспериментальными результатами и биофизической теорией [146, 179]. Авторы [24, 180] считают, что электрические поля, индуцируемые в тканях человека магнитными полями окружающей среды на уровне отдельных клеток, слишком слабы, чтобы преодолеть уровень теплового шума на клеточных мембранах. Этот вывод теперь подвергается сомнению на том основании, что такая простая интерпретация базируется на моделях, которые, вероятно, имеют очень ограниченную применимость к биологическим системам [181, 182]. В [24, 180] не рассматривались неравновесные явления, такие как коллективные переходы, с помощью которых крайне слабые сигналы могут влиять на свойства клеточных мембран [183, 184]. Ряд новых идей для обьяснения связей электромагнитных полей с живыми клетками и тканями включает в себя возможность преобразования и усиления процессов на клеточных мембранах (см., например, [4, 144]).

Некоторые экспериментальные результаты позволяют предположить существование резонансного механизма, при котором слабое статическое магнитное поле, сравнимое по силе с геомагнитным, и меняющееся во времени магнитное поле в низкочастотном диапазоне могут вызывать значительные биологические эффекты [185 – 187]. Таким образом, когда суперпозиция статического, например статического геомагнитного поля, и меняющихся во времени магнитных полей ($B_{\mathrm{Dc}} + B_{\mathrm{Ac}}\cos\omega t$, где ω — угловая скорость меняющегося во времени поля) действует на биосистему, то биологические эффекты наблюдаются на частоте

$$\omega_{\mathrm{c}} = \frac{q_{\mathrm{i}}B_{\mathrm{Dc}}}{m_{\mathrm{i}}}\,. \qquad (40)$$

Здесь ω_{c} — это циклотронная резонансная частота, q_{i} и m_{i} — заряд и масса ионов ткани. Так как (40) соответствует, по крайней мере формально, циклотронной частоте иона, то изменения функциональных свойств биосистем на частоте $f_{\mathrm{c}} = \omega_{\mathrm{c}}/(2\pi)$ называются ионно-циклотронным резонансом биосистем [188]. Для типичной области значений геомагнитного поля (35 – 65 мкТл) резонансные частоты многих биологически важных ионов (калий, кальций, натрий, ванадий, магний, литий, водород и т.д.) приходятся как раз на УНЧ и КНЧ область. Однако известно, что реальное циклотронное движение ионов в жидкостях не может иметь место даже при больших амплитудах магнитных полей [188]. Разработаны модели, с помощью которых пытаются преодолеть эту трудность. В работах [185, 186] предложен следующий механизм: магнитное поле (сила Лоренца) создает определенные пути для движения ионов K^+, Mg^{++} и Ca^{++} поперек ионных каналов мембраны (в которых кинетика соударений менее важна). В работе [189] сделано предположение, что на поверхности мембраны есть особая водоотталкивающая область, существование которой позволяет использовать уравнения для описания взаимодействий ионов с магнитным полем в вакууме. В модели [190], полученной на основе теоретических исследований [191], резонансные эффекты комбинированного статического и КНЧ магнитного полей проявляются как результат воздействия на вибрационные энергетические уровни иона и взаимодействия с участками связи (рецепторами). Эту модель можно рассматривать как своеобразный аналог явления, известного в атомной спектроскопии как параметрический резонанс [192]. В предложенных резонансных механизмах величина переменного магнитного поля не является обязательным ключевым фактором. Ответ биосистемы зависит от соотношения между величиной постоянного и переменного полей и их направлений и частоты ω, различных для разных моделей. Это позволяет также объяснить, почему биосистемы иногда могут быть более чувствительны к некоторым естественным магнитным вариациям, чем к более сильным искусственным магнитным полям.

Однако все эти теоретические модели имеют ограничения и недостатки и критикуются на основе классических физических принципов [193 – 196].

8.2. Проблема оценки воздействия магнитных полей

При отсутствии установленного механизма взаимодействия биосистем с магнитным полем не ясно, какие характеристики поля являются опасными для здоровья:

величина, спектральный состав, форма волны, длительность воздействия или особая комбинация этих характеристик. Не известно также, каковы пределы изменений этих характеристик. Иначе говоря, не известна функциональная связь между воздействием магнитного поля и вызываемыми им последствиями для здоровья. В большинстве эпидемиологических исследований предполагается, что влияние на здоровье человека пропорционально средневзвешенной по времени величине поля или пропорционально произведению силы поля на время. Средневзвешенные или подобные им характеристики часто используются потому, что их легко оценить и они вписываются в понятие дозы, которое успешно применяется в радиационной биологии и токсикологии. Однако есть много лабораторных и клинических данных, указывающих на то, что метод средневзвешенных может быть не лучшей характеристикой степени воздействия магнитного поля [26, 197]. В отличие от ионизующего излучения и большинства химических факторов влияние магнитных полей на низких частотах, по-видимому, крайне нелинейно, на что указывает существование "окон" в интенсивности и явления резонансного типа. Может играть роль прерывистость, изменчивость и, возможно, геомагнитное поле. Пока мало что известно о связи "дозы" воздействия магнитного поля с последствиями для здоровья. Некоторые исследователи предполагают, что пики поля, а не его суммарное или среднее воздействие могут быть важны. В частности, пики могут иметь значение при острых сердечно-сосудистых заболеваниях. Чтобы учесть нелинейные связи между воздействием поля и реакцией организма, было предложено несколько других способов оценки воздействия поля, в том числе индексы порогового типа или типа "окон": т.е. эффекты могут быть пропорциональны времени воздействия при интенсивности выше некоторого порога или при интенсивности, находящейся в некоторых пределах, в "окнах" интенсивности [118, 198]. Однако среди экспертов в области биоэлектромагнитных исследований нет единого мнения о том, какая характеристика воздействия является наиболее верной [198].

9. Краткие выводы

В настоящее время не ясна биология взаимодействия биосистем с магнитным полем, но ряд результатов с достоверностью показывают, что воздействие низкочастотных магнитных полей малой интенсивности может вызывать биологические эффекты, хотя энергия воздействия очень мала. Несмотря на некоторую неопределенность в результатах исследований, очевидно, что эти биологические эффекты могут приводить к вредным для здоровья последствиям. Главное внимание в этих исследованиях уделялось КНЧ полям (10 – 300 Гц), однако в последне время стали рассматривать и УНЧ (0 – 10 Гц) поля.

а. *Естественные геомагнитные поля*. Естественные геомагнитные поля находятся в основном в УНЧ диапазоне. Для геомагнитных бурь характерны нерегулярные вариации со сложным спектральным составом, обусловленным суперпозицией вариаций с разными амплитудами на различных УНЧ частотах, наличием иррегулярных импульсов и других переходных явлений. Вероятно, УНЧ диапазон магнитных полей в окружающей среде имеет существенное биологическое значение, так как он соответствует основным физиологическим ритмам (ЭЭГ, ЭКГ, частоте дыхания и т.п.). В ряде исследований обнаружена положительная связь между уровнем заболеваемости сердечно-сосудистой и нервной систем и возмущениями геомагнитного поля. В частности, установлено, что количество инфарктов миокарда, инсультов и ДТП достоверно увеличивается во время геомагнитных возмущений особого класса, т.е. бурь, сопровождающихся уменьшениями интенсивности космических лучей, так называемыми форбуш-понижениями. Этот тип геомагнитных бурь, связанных с солнечной активностью и возмущениями в солнечном ветре, можно рассматривать как явления, потенциально опасные для здоровья человека.

б. *Техногенные магнитные поля*. Первоначально интересы исследователей были сосредоточены на магнитных полях от мощных ЛЭП из-за их большой протяженности и возможной связи с увеличением числа злокачественных заболеваний. В последние годы стали интересоваться также электрифицированным транспортом. Оказалось, что общественный электротранспорт генерирует крупномасштабные магнитные поля, которые являются самыми интенсивными в окружающей среде плотно населенных городских районов и на рабочих местах. Их амплитуды различны для разного типа поездов и меняются от нескольких единиц до сотен мкТл. В частности, было установлено, что средний уровень магнитных полей в кабинах машинистов в российских поездах, работающих на постоянном токе, составляет 50 – 70 мкТл в электричках (МВС) и в 2 – 3 раза выше — в электролокомотивах (ЭЛ). Магнитные поля в окружающей среде, генерируемые электрифицированным транспортом, резко отличаются по частотному диапазону и по уровню интенсивности от полей на частоте 50 Гц: они обладают такой же иррегулярностью, как и естественные геомагнитные возмущения, и их частотный диапазон лежит, в основном, также в УНЧ области. Вследствие таких свойств в результате их воздействия можно ожидать их влияния на сердечно-сосудистую систему. Действительно, было установлено, что машинисты разного типа российских электропоездов, работающих на постоянном токе, в частности, электричек и ЭЛ подвержены разной степени риска заболевания ишемической болезнью сердца (ИБС). У машинистов ЭЛ риск заболевания в $2 \pm 0{,}27$ раза выше, чем у машинистов электричек. Анализ показал, что повышенный риск заболеваний ИБС у машинистов ЭЛ можно отнести за счет повышенного уровня УНЧ магнитных полей на их рабочих местах.

10. Задачи для исследований: междисциплинарный аспект

Чтобы исследовать возможные последствия воздействия на здоровье человека транспортных магнитных полей и геомагнитных вариаций во время бурь, необходимо биологические исследования, выполненные, в основном, с синусоидальными полями с частотой 50 и 60 Гц, повторить с УНЧ магнитными полями, имеющими сложный частотный спектр, в особенности, импульсы, скачки и другие переходные явления. Необходимо выделить их типичные характерные особенности и понять, какие из этих особенностей могут быть наиболее биоэффективными. Однако, так как мы не знаем, как тело

человека взаимодействует с магнитным полем, то не известно, каким параметрам поля отдавать предпочтение — амплитуде, частоте или какой-либо другой характеристике.

Последние результаты, приведенные в разделах 4 и 6, представляют собой основу для выбора пути дальнейших исследований в этой области. Они указывают, что, во-первых, существует особый класс потенциально опасных для здоровья геомагнитных бурь (связанных с форбуш-понижениями интенсивности космических лучей) и, во-вторых, существует особый класс техногенных магнитных полей, генерируемых электротранспортом. Эти факты могут служить отправной точкой для обнаружения опасных для здоровья человека характеристик УНЧ магнитных полей. Необходимо сравнить частотные характеристики и структуру естественных и техногенных магнитных полей. Выявленные различия и общие черты могли бы помочь определить важные с биологической точки зрения особенности магнитных полей УНЧ диапазона. Имея эту информацию, можно смоделировать УНЧ магнитные поля с такими характеристиками и использовать их в лабораторных исследованиях.

Мы хотим подчеркнуть, что такие исследования носят существенно междисциплинарный характер. В рамках такого междисциплинарного подхода начинает работать международный коллектив различных специалистов в области физики, магнитометрии, медицины, биологии и эпидемиологии (из семи институтов пяти стран) по общему проекту, поддержанному Европейским сообществом. Чтобы учесть характерные особенности транспортных магнитных полей, должны быть развиты новые методы оценки воздействия магнитных полей и на этой основе исследованы эффекты воздействия модельных транспортных магнитных полей с их характерными особенностями на функции сердечно-сосудистой и центральной нервной систем животных и человека; будут проведены обширные эпидемиологические исследования на Швейцарской железной дороге с тем, чтобы исследовать возможную связь между воздействием магнитных полей на человека и уровнем сердечно-сосудистой заболеваемости. Результаты осуществления данного проекта дадут основу для дальнейшего сравнения с характерными особенностями наиболее биоэффективных геомагнитных бурь.

Настоящая работа частично поддержана Европейской комиссией (INCO-COPERNICUS contract No ERBIC15-CT96-0303).

Список литературы

1. Wertheimer N W, in *Mechanisms of Carcinogenesis* (Ed. E K Weisburger) (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1989) p. 188
2. Kaune W T, Anderson L E, in *Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields: the Question of Cancer* (Eds B W Wilson, R G Stevens, L E Anderson) (Columbus, OH: Battele Press, 1989) p. 17
3. Goldberg R B, Creasey W A *Med. Hypoth.* **35** 265 (1991)
4. Foster K R *Health Phys.* **62** 429 (1992)
5. Anderson L E *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* **54** 186 (1993)
6. Liburdy R P *Radio Sci.* **30** 179 (1995)
7. Brodeur P *Currents of Death* (New York: Simon and Shuster, 1989); see also *The New Yorker*, 7 December 1992, p.86
8. Coghill R *Killing Fields, Electronics World + Wireless World* **2** 112 (1990)
9. Savitz D A *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* **54** 165 (1993)
10. Kavet R I *Bioelectromagnetics* **17** 339 (1996)
11. Dietrich F M et al., in *Electricity and Magnetism in Biology and Medicine* (Ed. M Blank) (San Francisco: Press Inc., 1993) p. 267
12. Kaune W T et al., in *17th Annual Meeting of Bioelectromagnetics Society, Abstracts* (Boston, MA, USA, 1995) p. 66
13. Кудрин В А и др. *Гигиена и санитария* (3) 13 (1995)
14. Ptitsyna N G et al. *Bioelectromagnetics* **17** 436 (1996)
15. Владимирский Б М *Биофизика* **40** 950 (1995)
16. Roederer J G *EOS, Transactions, American Geophysical Union* **76** 441 (1995)
17. Roederer J G *Space Medicine & Medical Engineering* (Jpn) **9** 7 (1996)
18. Villoresi G et al. *Phys. Med.* **10** 79 (1994)
19. Villoresi G et al. *Phys. Med.* **10** 107 (1994)
20. Ptitsyna N G et al. *Phys. Med.* **11** 93 (1995)
21. Polk C, Fichten F *J. Res. NBS* **66D** 313 (1962)
22. Nishida A *Geomagnetic Diagnosis of the Magnetosphere* (New York, Heidelberg, Berlin: Springer Verlag, 1978)
23. Villante U et al. *Annales Geophysicae* **8** 337 (1990)
24. Bennett W R (Jr) *Phys. Today* **47** (4) 23 (1994)
25. Gauger J *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **104** 2436 (1985)
26. Bracken T D *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* **54** 165 (1993)
27. Kavet R I, Banks R S *Environ. Res.* **39** 386 (1986)
28. Ho A M, Frazer-Smith A C, Villard Jr O *Radio Sci.* **14** 1011 (1979)
29. Птицына Н Г и др. *Медицина труда и промышленная экология* **12** 22 (1996)
30. Ptitsyna N G et al., in *2nd World Congress for Electricity and Magnetism in Biology and Medicine, Abstracts* (Bologna, Italy, 1997)
31. Kazuo U, in *Memories of the Kakioka Magnetic Field Observatory* (Suppl.) **7** 17 (1977)
32. Вишнев В С, Дьяконова А Г, Хачай О А *Геология и геофизика* **36** 122 (1995)
33. Тясто М И и др. *Биофизика* **40** 839 (1995)
34. Allen S G et al. in *Review of Occupational Exposure to Optical Radiation and Electric and Magnetic Fields with Regard to the Proposed CEC Physical Agents Directive* (Chilton, Didcot, Oxon OX11 ORQ, National Radiological Protection Board, 1988) p. 31
35. Nakagava M, Koana T, in *Electricity and Magnetism in Biology and Medicine* (Ed. M Blank) (San Francisco: Press Inc., 1993) p. 264
36. Randall W, Randall S *Bioelectromagnetics* **12** 67 (1991)
37. Темурьянц Н А, Макеев В Б, Тишкин О Г *Советская медицина* **10** 66 (1980)
38. Комаров Ф И и др. *Итоги науки и техники: Медицинская география* **18** 172 (1989)
39. Темурьянц Н А, Владимирский Б М, Тишкин О Г *Сверхнизкочастотные сигналы в биологическом мире* (Киев: Наукова думка, 1992)
40. Friedman H, Becker R O, Bachman C H *Nature* (London) **200** 626 (1963)
41. Friedman H, Becker R O, Bachman C H *Nature* (London) **205** 1050 (1965)
42. Новикова К Ф и др. *Кардиология* **8** (4) 109 (1968)
43. Гневышев М Н, Новикова К Ф, в сб. *Влияние солнечной активности на атмосферу и биосферу Земли* (М.: Наука, 1971) с. 179
44. Gnevyshev M N, Novikova K F *Interdisciplinary Cycle Res.* **3** 99 (1972)
45. Новикова К Ф и др. *Проблемы космической биологии* **43** 9 (1982)
46. Stoupel E, Shimshoni M, in *Proc. Workshop on Solar-Terrestrial-Predictions* (Meudon, France, 1984) p. 596
47. Kuritzky A et al. *Headache* **27** 87 (1987)
48. Stoupel E et al., in *Proc. Workshop on Solar-Terrestrial Predictions* Vol. 2 (Leuta, Australia, 1989) p. 152
49. Stoupel E, Finkelstein M, in *Proc. Regional Symposium on Electromagnetic Compatibility* (Tel-Aviv, Israel: IEEE, 1992) p. 3.1.3
50. Takata M *Archiv fur Meteorologie, Geophysic and Bioklimatologie B* **2** (2) 486 (1941)
51. Takata M, Murasuga T *Bioklomat. Beibl.* **8** 17 (1941)
52. Beran G J *Interdisciplinary Cycle Res.* **3** 207 (1972)
53. Андронова Т И, Деряпа Н Р, Соломатин А П *Гелиометеотропные реакции здорового и больного человека* (Л.: Медицина, 1982)
54. Темурьянц Н А, Тишкин О Г *Лабораторное дело* **2** 3 (1983)
55. Гурфинкель Ю И и др. *Биофизика* **40** 793 (1995)
56. Baevsky R M et al., in *Proc. MEFA International Fair of Medical Technology and Pharmacy* (Brno, Czech Republic, 1996) (in press)
57. Reiter R *Arch. Phys. Therap.* **6** 210 (1954)

58. Reiter R *Phys. Blaetter* **11** 453 (1955)
59. Bhaskara Rao D S, Srivastava B J *Bull Nat. Geophys. Res. Inst.* (*India*) **8** 32 (1970)
60. Srivastava B J, Sahena S *Indian J. of Radio and Space Phys.* **9** 121 (1980)
61. Загускин Ю, Иванов В *Проблемы космической биологии* **43** 59 (1982)
62. Strestik J, Prigancova A *Acta Geodaet. Geophys. et Montanist. Hung.* **21** 155 (1986)
63. Finkelstein M, Brenner S, Ne'eman E, in *Proc. 5th Int. Conf. of Ecology and Environmental Quality Sciences* (Jerusalem, Israel, 1992) p. 18
64. Koenig H, Ankermueller F *Naturwissenschaften* **17** 47 (1960)
65. Ермолаев Г Т *Всесоюзный научно-технический симпозиум по физико-математическим и биологическим проблемам действия электромагнитных полей и ионизации воздуха* (Ялта) **2** 74 (1975)
66. Беленькая Р М, Караджаева С А *Журнал невропатологии и психиатрии* **78** 1329 (1978)
67. Бардов В Г, Габович Р Д, Никберг И И *Гигиена и санитария* **8** 111 (1977)
68. Белишева Н К и др. *Вестник Ленинградского государственного университета. Сер. 4* **2** 11 (1994)
69. Lipa B J, Sturrock P A, Rogot F *Nature* **259** 302 (1976)
70. Knox E G, Armstrong E, Lancashire R *Nature* **281** 564 (1979)
71. Беневоленский В Н, Воскресенский А Д *Вестник АН СССР* (10) 54 (1980)
72. Malin S R, Srivastava B J *Nature* **277** 646 (1979)
73. Malin S R, Srivastava B J *Nature* **283** 111 (1980)
74. Виллорези Дж и др. *Связь биологических и физико-химических процессов с космическими и гелиогеофизическими факторами* (Абстракт, Пущино Россия, 1996) с. 39 (в печати, *Биофизика*)
75. Susser M *Am. J. Epidemiol.* **105** 1 (1977)
76. Comba P *J. Exp. Clin. Cancer Res.* **12** 1 (1993)
77. Iucci N et al. *Nuovo Cimento C* **9** 39 (1986)
78. Villoresi G et al., in *Proc. 24th Int. Cosmic Ray Conf.* (*Rome*) **4** 1106 (1995)
79. Виллорези Дж и др. *Биофизика* **40** 983 (1995)
80. Dorman L I et al. *Nucl. Phys. B, Proc. Suppl.* **39A** 136 (1995)
81. Iucci N et al., in *Proc of the "E. Fermi Summer School" — Course "Solarterrestrial relationship and the Earth environment in the last millennia"* (Ed. G Cini Castagnoli) (Amsterdam: North-Holland Phys. Publ., 1988) p. 408
82. Kappenman J G, Albertson V D *IEEE Spectrum* March (1990)
83. Hruska J, Shea M A *Adv. Space Res.* **13** 451 (1993)
84. Dorman L I, Iucci N, Villoresi G *Astroph. and Space Sci.* **208** 55 (1993)
85. Dorman L I *Geophysical and Astrophysical Aspects of Cosmic Rays* (Amsterdam: North-Holland Publ. Co., 1963)
86. Blokh Ya L, Dorman L I, Kaminer N S, in *Proc. 6th Int. Cosmic Ray Conf.* (*Moscow*) **4** 178 (1959)
87. Dorman L I, Freidman G I, in *Proc. Conf. MHD and Plasma Phys.* (Riga, 1959) p. 77
88. Dorman L I, in *Proc. 6th Int. Cosmic Ray Conf.* (*Moscow*) **4** 132 (1959)
89. Dorman L I, Iucci N, Villoresi G, in *Proc. 24th Int. Cosmic Ray Conf.* (*Rome*) **4** 892 (1995)
90. Belov A V et al., in *Proc. 24th Int. Cosmic Ray Conf.* (*Rome*) **4** 888 (1995)
91. McCracken K G, Parsons N R *Phys. Rev.* **112** 1798 (1958)
92. Fenton A G et al. *Can. J. Phys.* **37** 970 (1959)
93. Nagashima K et al. *Nuovo Cimento C* **13** 551 (1990)
94. Nagashima K, Fujimoto K, Sakakibara S *Planet. and Space Sci.* **40** 1109 (1992)
95. Bavassano B et al. *J. Geophys. Res.* **99** 4227 (1994)
96. Dorman L I *Cosmic Rays: Variations and Space Explorations* (Amsterdam: North-Holland, 1974)
97. Belov A V et al. *Adv. Space Res.* **16** 249 (1995)
98. Козлов В И, Крымский П Ф *Физические основания прогноза катастрофических геофизических явлений* (Якутск: Якут. науч. центр СО РАН, 1993)
99. Дорман Л И, Либин И Я *УФН* **145** 403 (1985)
100. Berezhko E G et al., in *Proc. 20th Int. Cosmic Ray Conf.* (*Moscow*) **4** 99 (1987)
101. Wertheimer N W, Leeper E *Am. J. Epidemiol.* **109** 273 (1979)
102. Modan B *Am. J. Industr. Med.* **13** 625 (1988)
103. Ahlbom A *Scand. J. Work Environ. Health* **14** 337 (1988)
104. Асанова Т П, Раков А М *Гигиена труда и профзаболевания* **10** 50 (1962)
105. Вялов А М *Материалы 2-го Всесоюзного совещания по изучению влияния магнитного поля на биосистемы* (М., 1969) с. 56
106. Вялов А М *Гигиеническая оценка магнитных полей* (М., 1972) с. 7 (Материалы симпозиума 22–23 мая 1972 г.)
107. Korobkova V P et al. *Report on the CIGRE Session No. 23-06* (1972)
108. Perry F S et al. *Health Phys.* **41** 67 (1981)
109. Perry F S, Pearl L *Public Health* **102** 11 (1988)
110. Dawson D et al. *Practitioner* **232** 435 (1988)
111. Cook M R et al. *Bioelectromagnetics* **13** 261 (1992)
112. Baris D et al. *Occup. Environ. Med.* **53** 17 (1996)
113. Baris D, Armstrong B, Deadman J *Occup. Environ. Med.* **53** 25 (1996)
114. Wertheimer N W, Leeper E *Am. J. Epidemiol.* **11** 345 (1982)
115. Tomenius L *Bioelectromagnetics* **7** 191 (1986)
116. Coleman M P et al. *British J. Cancer* **60** 793 (1989)
117. Feychting M, Ahlbom A *Am. J. Epidemiol.* **138** 467 (1993)
118. Juutilainen J, Leera E, Pukkala E *Int. Arch. Occup. Environ. Health* **62** 289 (1996)
119. Demers P A et al. *Am. J. Epidemiol.* **134** 340 (1991)
120. Matanoski G M et al. *Am. J. Epidemiol.* **137** 609 (1993)
121. Savitz D A, Loomis D P *Am. J. Epidemiol.* **141** 123 (1995)
122. Tunes T, Anderson L *Lancet* **336** 8730 (1990)
123. Floderus B, Tornqvist S, Stenlund C *Cancer Causes Control* **5** 189 (1994)
124. Alfredsson L, Hammar N, Karlehagen S *Cancer Causes Control* **7** 377 (1996)
125. Balli-Antunes M, Pfluger D H, Minder C E *Environmetrics* **1** 121 (1990)
126. Pfluger D H, Minder C E *Report No. ISBN 3 9065 1910 2* (University of Berne, Dept. of Social & Preventive Med., 1995)
127. Villoresi G et al., in *2nd World Congress for Electricity and Magnetism in Biology and Medicine, Abstracts* (Bologna, Italy, 1997)
128. Jauchem J R *J. Microwave Power and Electromag. Energy* **30** 165 (1995)
129. Perry F S, Pearl L, Binns R *Public Health* **103** 177 (1989)
130. Bell G B, Marino A A, Chesson A L *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* **83** 389 (1992)
131. Lyskov E B et al. *Bioelectromagnetics* **14** 87 (1993)
132. Whittington C J, Podd J V, Rapley B R *Bioelectromagnetics* **17** 131 (1996)
133. Persinger M A, Nolan M *J. Bioelectricity* **4** 2 (1985)
134. Friedman H, Becker R O, Bachman C H *Nature* (London) **213** 949 (1967)
135. Медведев С В и др. *Физиология человека* **18** (5) 41 (1992)
136. Graham C et al. *Bioelectromagnetics* **15** 447 (1994)
137. Maresh C M et al. *Aviat. Space Environment. Med.* **59** 1139 (1988)
138. Graham C et al., in *Interaction of Biological Systems with Static and ELF Electric and Magnetic Fields* (Eds L Anderson, R Weigel, B Kelman) (Washington: NTIS, 23rd Annual Hanford Life Sciences Symp, 1984) p. 471
139. Graham C, Sastre A, Cook M R, in *2nd World Congress for Electricity and Magnetism in Biology and Medicine, Abstracts* (Bologna, Italy, 1997)
140. Kavaliers M, Eckel L A, Ossenkopp K P *J. Compt. Physiol. A* **173** 241 (1993)
141. Jentsch A et al. *Neurosci. Let.* **1** 79 (1993)
142. Lovely R H et al., in *16th Annual Meeting of Bioelectromagnetic Society, Abstracts* (1994)
143. Silney J, in *Proc. Symposium on Biological Effects of Static and ELF Magnetic Fields* (Ed. J Berhardt) (Munich: BGA-Schrifteinreibe, MMv Medizin Verlag, 1985)
144. Tenforde T S, Kaune W T *Health Phys.* **53** 585 (1987)
145. Reilly J P *Med. Biol. Eng. Comp.* **27** 101 (1989)
146. Tenforde T S *Ann. Rev. Publ. Health* **13** 173 (1992)
147. Reille A *J. Physiol.* (*Paris*) **30** 85 (1968)
148. Ramon C, Powell M R *Bioelectromagnetics* **13** 303 (1992)
149. Артюшенко Б А и др. *Проблемы космической биологии* **43** 139 (1982)
150. Bellossi A, Desplaces A, Morin R, in *8th Annual Meeting of Bioelectromagnetics Society, Abstracts* (Frederick, MD, 1986) p. 51b

151. Beniashvili D S, Bilanishvili V G, Menabde M Z *Cancer Let.* **61** 75 (1991)
152. McLean J R N et al., in *13th Annual Meeting of Bioelectromagnetics Society, Abstracts* (Salt Lake City, USA, 1991)
153. Cleary S F A *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* **54** 178 (1993)
154. Wilson B W, Reiter R J, Pilla A A, in *Electricity and Magnetism in Biology and Medicine* (Ed. M Blank) (San Francisco: Press Inc., 1993) p. 251
155. Adey W R, in *Biological Coherence and Response to External Stimuli* (Ed. H Frohlih) (Heidelberg: Springer-Verlag, 1988) p. 148
156. Leal J et al. *J. Boielectricity* **7** 141 (1989)
157. Макеев В Б, Темурьянц Н А *Проблемы космической биологии* **43** 116 (1982)
158. Gavalas-Medici R, Day-Magdaleno S *Nature* **261** 256 (1976)
159. Bawin S M et al. *Bioelectromagnetics* **17** 386 (1996)
160. Лебедева Н Н, Вехов А В, Баженова С И *Проблемы электромагнитной нейробиологии* (М.: Наука, 1988) с. 85
161. Kavet R I, in *Future Epidemiologic Studies of Health Effects of Electric and Magnetic Fields* (Palo Alto, CA: Electric Power research Institute, EPRI report TR-101175, 1992) p. A47
162. Reiter R J, in *Annual Review of Research on Biological Effects of 50 and 60 Hz Electric and Magnetic Fields* (Denver, CO.: DOE, A-30, 1990)
163. Lerchl A et al. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* **169** 102 (1990)
164. Frazer-Smith A C, Coates D B *Radio Sci.* **13** 661 (1978)
165. Dietrich F M, Feero W E, Jacobs W L *Final Report of Electric Research and Management* (Inc to National Transportation Systems Center, September 8, 1997)
166. Paul H U et al., in *Interference of Monitors by Magnetic Fields of Power Frequency Installations and Traction Lines* (Paris, France: CIGRE, 1990) p.36
167. Minder C E, Pfluger D H *Radiation Protection Dosimetry* **48** 351 (1993)
168. Anger G, Berglund A, Hansson Mild K *Magnetic Fields in Electric Locomotives, SSI Report 97.04 ISS No 282-4434* (Swedish Radiation Protection Institute, Stocholm, Sweden, 1997)
169. Ptitsyna N G et al. *Report FIZ-97-1* (St. Petersburg: SPbFIZMIR-AN, 1997)
170. Jackson J D *Classical Electrodynamics* (New York: Wiley & Sons, 1975)
171. Neurath P W, in *Biological Effects of Magnetic Fields* Vol. 1 (Ed. M F Barnothy) (New York: Plenum Press, 1964) p. 25
172. Frankel R B, in *CRC Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields* (Eds C Polk, E Postow) (Boca Raton, Fla: CRC Press, 1986) p. 180
173. Kirshvink J L, Kobayashi-Kirshvink A, Woodford B *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* **89** 7683 (1992)
174. Kirshvink J L *EOS Trans. Am. Geophys. Union* **75** (15) (1994)
175. Beason R C, Nichols J E *Nature* **309** 151 (1984)
176. Towne W F, Gould J L, in *Magnetic Biomineralization and Magnetoreception in Organisms* (Eds J L Kirschvink, D S Jones, B J MacFadden) (New York: Plenum Press, 1985) p. 385
177. Корчевский Э М, Марочник Л С *Биофизика* **10** 371 (1965)
178. Варданян В А *Биофизика* **18** 491 (1973)
179. Hilemann B *Chem. Eng. News* **71** 15 (1993)
180. Adair R K *Phys. Rev. A* **43** 1039 (1991)
181. Polk C *Bioelectromagnetics* **15** 261 (1994)
182. Engstroem S *Bioelectromagnetics* **17** 58 (1996)
183. Adey W R *Physiol. Rev.* **61** 435 (1981)
184. Taylor L S *Bioelectromagnetics* **2** 259 (1981)
185. McLeod B R, Liboff A R *Bioelectromagnetics* **7** 177 (1986)
186. Liboff A R et al. *J. Bioelectricity* **6** 13 (1987)
187. Ross S M *Bioelectromagnetics* **11** 27 (1990)
188. Liboff A R *J. Biol. Phys.* **13** 99 (1985)
189. Chiabrera A et al., in *Interaction Between Electromagnetic Field and Cells* (Eds A Chiabrera, C Nicolini , H P Schwan) (London: Plenum Press, 1985) p. 253
190. Lednev V V *Bioelectromagnetics* **12** 71 1991
191. Подгорецкий М И, Хрусталев О А *УФН* **81** 217 (1963)
192. Александров Е Б и др. *ЖЭТФ* **45** 503 (1963)
193. Halle B *Bioelectromagnetics* **9** 381 (1988)
194. Sandweiss J *Bioelectromagnetics* **11** 203 (1990)
195. Adair R K *Bioelectromagnetics* **13** 231 (1992)
196. Adair R K *Bioelectromagnetics* **17** 242 (1996)
197. Lovely R H *Microwave News* (May/June) 5 (1993)
198. Morgan M G, Nair I *Bioelectromagnetics* **13** 335 (1992)

Natural and technogenic low-frequency magnetic fields as a potential health hazard

N.G. Ptitsyna, M.I. Tyasto
SPbF IZMIRAN, Muchnoĭ per. 2, Box 188, 191023 St. Petersburg, Russia
Fax (7-812) 310-50 35
E-mail: galina@admin.izmi.ras.spb.ru, natasha@ngp.izmi.ras.spb.ru
G. Villoresi
Institut di Fisica Spacio Interplanetario, Consiglio Nazionall delle Ricerche (IFSI/CNR),
Universita' degli Studi "Roma Tre", Dipartamento di Fisica "E. Amaldi",
Via della Vasca Navale 84, 00146 Rome, Italy
Tel. 39-6-551 77 249. Fax +39-6-557 93 01
E-mail: villoresi@amaldi.fis.uniroma3.it
L.I. Dorman
IZMIRAN, 142092 Troitsk, Moscow Region, Russia
Fax (7-095) 334-01 24
Cosmic Ray Center, Technion, Haifa 32000, Israel
Fax (972) 6-961930
E-mail: lid@physics.technion.ac.il
N. Iucci
Università degli Studi "Roma Tre", Dipartimento di Fisica "E. Amaldi",
Via della Vasca Navale 84, 00146 Rome, Italy
Fax +39-6-557 9303
E-mail: iucci@amaldi.fis.uniroma3.it

Is human health affected by low-frequency low-intensity environmental magnetic fields? There is much die-hard evidence that it is. For this reason irregular, spectrally complex ULF (0–10 Hz) magnetic fields have recently come under scrutiny, typical of natural geomagnetic perturbations or induced by electric transportation means. Recent work shows that such fields do affect the nervous system and may even cause heart attacks.

PACS numbers: **87.40.+w, 87.50.–a**
Bibliography — 198 references

Received 23 September 1997, revised 14 November 1997